

Resum

L'objectiu principal d'aquest treball és de grau consisteix en analitzar la capacitat resistent dels perfils primers tipus *rack* sotmesos a flexo-compensió, a través de l'experimentació, simulacions numèriques i mitjançant el càlcul normatiu. També s'analitzarà la influència de les perforacions en la seva capacitat resistent i el comportament a post-col·lapse. El treball disposa d'una breu introducció per tal de conèixer el món dels perfils primers en les prestatgeries metàl·liques per a palets.

Per aconseguir els objectius marcats s'utilitzen assaigs experimentals i simulacions mitjançant el mètode dels elements finits. Primerament, ha estat necessari realitzar el disseny d'un utilatge per assajar un perfil tipus *rack* de forma excèntrica per tal d'introduir el moment flector i l'esforç axil desitjat. El disseny permet aplicar diferents valors d'excentricitat horitzontal, per tal d'analitzar el comportament del perfil amb més o menys moment flector.

Adicionalment, s'ha realitzat un model 3D de l'assaig experimental realitzat, utilitzant el programa SolidWorks 13. D'aquesta manera, es pot visualitzar d'una manera senzilla totes les parts de les que consta el banc de càrregues i els utilatges necessaris per a realitzar els assajos. A més a més, s'ha realitzat un vídeo amb el programa Blender 2.72b, que permet fer-se una millor idea de les parts del utilatge i com estan acoblades entre elles.

En segon lloc, es reproduïxen els diferents assajos realitzats experimentalment mitjançant el mètode dels elements finits amb el programa ANSYS 13.0. En aquest treball es realitzen dos tipus de simulacions, unes incorporant les tensions residuals i l'enduriment per deformació derivats del procés de fabricació i les altres sense. En les simulacions sense els efectes del conformat, s'estudiarà la necessitat o no d'incorporar una imperfecció geomètrica "fictícia" per tal d'obtenir una bona predicció de la capacitat resistent de l'element estructural.

Per a finalitzar els càlculs numèrics, es calcularan les prediccions de capacitat resistent que marca la normativa europea (EC3 i EN 15512:2009 (E)) [5] i es compararan els resultats amb els valors experimentals i les simulacions realitzades per tal d'avaluar la diferència existent entre els valors resistents obtinguts mitjançant aquestes metodologies.

Finalment, el treball inclou un estudi d'impacte ambiental i un estudi econòmic.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
LLISTAT DE FIGURES	5
LLISTAT DE TAULES	9
GLOSSARI	11
1. INTRODUCCIÓ	13
1.1. Objectius	13
1.2. Abast	13
2. ESTAT DE L'ART	15
2.1. Perfils primers d'acer conformats en fred	15
2.2. Perfils tipus <i>rack</i> : Parts del perfil.	18
2.3. Unió semirígida puntal-llarguer	19
2.4. Fallida dels perfils tipus <i>rack</i>	21
2.5. Càlcul resistent del perfil tipus <i>rack</i> .	23
2.5.1. Mètode dels elements finits	24
2.5.2. Càlcul normatiu	27
2.6. Tensions residuals i enduriment per deformació deguts al procés de fabricació dels perfils.	27
3. ASSAIG EXPERIMENTAL A FLEXO-COMPRESSIÓ	33
3.1. Secció analitzada	33
3.2. Característiques del material	34
3.3. Muntatge experimental.	36
3.3.1. Utilitatge de compressió	37
3.3.2. Disseny i confecció d'una placa auxiliar.	38
3.3.3. Banc de càrregues.	39
3.3.4. Punt d'aplicació de la càrrega.	41
3.3.5. Captadors de desplaçament i cèl·lula de càrrega.	42
3.4. Resultats	44
3.4.1. Tipus de fallida dels perfils assajats	46
3.4.2. Gràfiques força-desplaçament dels assajos realitzats	48
4. SIMULACIONS NUMÈRIQUES	51

4.1. Perfil i material d'estudi.....	51
4.2. Càlcul de la càrrega última mitjançant imperfecció geomètrica	52
4.2.1. Definició del model i condicions de contorn.....	54
4.3. Resultats numèrics	56
4.4. Càlculs addicionals del perfil sense perforacions.....	60
4.4.1. Extrem de l'ala més llarga	61
4.4.2. Ala inclinada	62
4.4.3. Secció real.....	64
4.5. Tensions residuals.....	65
4.5.1. Patró de tensions residuals	66
4.5.2. Introducció de l'enduriment per deformació.....	69
4.5.3. Definició del model i condicions de contorn.....	69
4.5.4. Resultats numèrics	70
4.6. Gràfiques força-desplaçament de les simulacions numèriques.....	72
5. CÀLCUL NORMATIU MITJANÇANT LA NORMATIVA EUROPEA	
(EN15512)	75
6. COMPARACIÓ DE RESULTATS	83
7. ESTUDI ECONÒMIC	89
8. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL	91
9. CONCLUSIONS	93
AGRAÏMENTS	95
BIBLIOGRAFIA.....	97

Llistat de Figures

Fig. 2.1 Estructura convencional de paletització. Font: [2].....	15
Fig. 2.2 (a) Bastidor d'una estructura convencional de paletització. (b) Unió cargolada entre puntal i diagonal. (c) Unió cargolada entre puntal i placa-terra. (d) Unió per pestanyes entre puntal i llarguer. Font: [2].....	16
Fig. 2.3 Algunes unions puntal-llarguer.....	17
Fig. 2.4 Zones d'una secció rack.	19
Fig. 2.5 Gràfic M- , amb els tres tipus d'unions esmentats.....	20
Fig. 2.6 (a) Unió rígida (b) Unió semirígida (c) Unió articulada. Font: [20].....	20
Fig. 2.7 Moment flector resultant, després del càlcul resistent de l'estructura per a palets. Font: [20]	21
Fig. 2.8 Vincament local	22
Fig. 2.9 (1) Vincament distorsional simètric (2) Vincament distorsional asimètric.	23
Fig. 2.10 (1) Vincament global a flexió (2) Vincament global a torsió (3) Vincament global a flexo-torsió.	23
Fig. 2.11 Distorsional asimètric	25
Fig. 2.12 Distorsional simètric (tancat).....	26
Fig. 2.13 Distorsional simètric (obert)	26
Fig. 2.14 Distorsional amb el col·lapse d'una ala.	26
Fig. 2.15 Rodets d'un procés de roll-forming. Font: [21].....	28
Fig. 2.16 Zones on es van col·locar les galgues extensiomètriques per obtenir les tensions residuals	29
Fig. 2.17 Zones on es van extreure les provetes de les parts planes.....	29
Fig. 2.18 Model d'elements finits del procés de conformat. Font: [6].....	31
Fig. 3.1 Geometria del perfil assajat. Font: [3].....	33
Fig. 3.2 Zones d'on s'han extret les provetes per al perfil amb i sense perforacions, respectivament	34
Fig. 3.3 Assaig a tracció de les provetes extretes dels puntals. Font: [6]	34
Fig. 3.4 Assaig a tracció del perfil sense perforacions	35
Fig. 3.5 Assaig a tracció del perfil amb perforacions	36
Fig. 3.6 Model 3D del muntatge experimental	37
Fig. 3.7 Unió del puntal amb l'utilatge de compressió. Placa 10,5-12,5 mm encerclada en vermell...	37
Fig. 3.8 Placa dissenyada per aplicar excentricitat a la càrrega	38

<i>Fig. 3.9 Unió del puntal amb les plaques de subjecció.....</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 3.10 Detall unió del utilatge que subjecta el puntal i el banc de càrregues, condicions de contorn</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 3.11 Detall acoblament de la bola del cilindre hidràulic</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 3.12 Detall de l'assaig a columna curta per a l'obtenció del centre de gravetat efectiu. Font:[1].</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 3.13 Centre de gravetat efectiu per ambdós perfils</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 3.14 Detall de la col·locació dels captadors per mesurar el desplaçament longitud al del puntal durant l'assaig</i>	<i>42</i>
<i>Fig. 3.15 Posició dels captadors de desplaçament en el muntatge experimental.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 3.16 Muntatge per l'assaig experimental a flexo-compensió</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 3.17 Detall de la col·locació dels captadors de desplaçament i de la unió puntal-utilatge.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 3.18 Perfils assajats, amb i sense perforacions respectivament.....</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 3.19 Fallida del puntal sense perforacions amb 0mm d' excentricitat aplicada.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 3.20 Fallida del puntal sense perforacions amb 20mm d'excentricitat aplicada.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 3.21 Resultats per als perfils amb perforacions amb 0mm d'excentricitat de la càrrega.....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 3.22 Resultats per als perfils amb perforacions amb 20mm d'excentricitat de la càrrega.....</i>	<i>49</i>
<i>Fig. 3.23 Resultats per als perfils sense perforacions amb 0mm d'excentricitat de la càrrega</i>	<i>49</i>
<i>Fig. 3.24 Resultats per als perfils amb perforacions amb 20 mm d'excentricitat de la càrrega</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 4.1 Perfils d'estudi per a les simulacions numèriques</i>	<i>51</i>
<i>Fig. 4.2 Esquema de càlcul de la metodologia del mode FEM apropiat. Font: [6]</i>	<i>53</i>
<i>Fig. 4.3 Condicions de contorn per a la placa oposada a on s'aplica la càrrega</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 4.4 Condicions de contorn per a la placa per on s'aplica la càrrega</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 4.5 Model material utilitzat en les simulacions numèriques. El comportament plàstic segueix una corba de Swift. Font: [6].....</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 4.6 Comparació dels resultats numèrics amb els resultats experimentals per al perfil amb perforacions.....</i>	<i>59</i>
<i>Fig. 4.7 Comparació dels resultats numèrics amb els resultats experimentals per al perfil sense perforacions.....</i>	<i>59</i>
<i>Fig. 4.8 Gruixos mesurats en el perfil sense perforacions en cada un dels dos extrems, en mm.....</i>	<i>60</i>
<i>Fig. 4.9 Perfil amb i sense perforacions, respectivament.</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 4.10 Perfil sense perforacions, ala més llarga</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 4.11 Perfil sense perforacions, ala inclinada.....</i>	<i>63</i>
<i>Fig. 4.12 Perfil sense perforacions, geometria real.....</i>	<i>64</i>

Fig. 4.13 Tensions residuals longitudinals en la cara anterior. (Esquerra) Valors en els punts d'integració. (Dreta) Valors extrapolats. Font: [6]	66
Fig. 4.14 Tensions residuals longitudinals en la cara exterior. (Esquerra) Valors en els punts d'integració. (Dreta) Valors extrapolats. Font: [6]	66
Fig. 4.15 Tensions residuals longitudinals de membrana. (Esquerra) Valors en els punts d'integració. (Dreta) Valors extrapolats. Font: [6]	67
Fig. 4.16 Zones diferents al llarg del mòdul (pitch) del puntal amb perforacions. Font: [6]	67
Fig. 4.17 Primera secció utilitzada per a definir el patró virtual, del node P al P'. Font: [6]	68
Fig. 4.18 Segona secció utilitzada per definir el patró virtual, del node P' al P". Font: [6]	68
Fig. 4.19 Comparativa entre el comportament material de les zones endurides respecte a les zones planes utilitzada en la simulació per elements finits. Font: [6]	69
Fig. 4.20 Comparació entre l'element placa utilitzat en el càlcul amb imperfecció geomètrica (esquerra) i l'element sòlid utilitzat en el càlcul amb tensions residuals (dreta)	70
Fig. 4.21 Deformades per a les simulacions amb tensions residuals, amb 0 i 20mm d'excentricitat aplicada	72
Fig. 4.22 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil amb perforacions amb 0mm d'excentricitat aplicada	72
Fig. 4.23 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil amb perforacions amb 20mm d'excentricitat aplicada	73
Fig. 4.24 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil sense perforacions amb 0mm d'excentricitat aplicada	73
Fig. 4.25 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil sense perforacions amb 0mm d'excentricitat aplicada	74
Fig. 5.1 Seccions utilitzades per al càlcul de les propietats geomètriques de la secció, amb i sense forats respectivament.	75
Fig. 5.2 Secció del perfil amb perforacions després d'aplicar la metodologia del gruix equivalent	78
Fig. 5.3 Comparativa entre els resultats experimentals i amb normativa europea pel puntal amb perforacions	81
Fig. 5.4 Comparativa entre els resultats experimentals i amb normativa europea pel puntal sense perforacions	81
Fig. 6.1 Comparació entre les càrregues últimes obtingudes mitjançant els diversos mètodes utilitzats per al perfil amb perforacions	84
Fig. 6.2 Comparació entre les càrregues últimes obtingudes mitjançant els diversos mètodes utilitzats per al perfil sense perforacions.	85
Fig. 6.3 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil amb perforacions i 10mm d'excentricitat aplicada	86

<i>Fig. 6.4 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil amb perforacions i 20mm d'excentricitat aplicada</i>	<i>86</i>
<i>Fig. 6.5 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil sense perforacions i 10mm d'excentricitat aplicada.....</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 6.6 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil sense perforacions i 20mm d'excentricitat aplicada.....</i>	<i>87</i>

Llistat de Taules

<i>Taula 2.1 Descripcions de les parts del perfil tipus rack</i>	<i>18</i>
<i>Taula 2.2 Valor de les tensions residuals de flexió i membrana obtingudes experimentalment. Font: [6]</i>	<i>29</i>
<i>Taula 2.3 Valors del límit elàstic i tensió última obtinguts en els assajos a tracció. Font:[6]</i>	<i>30</i>
<i>Taula 3.1 Resultats experimentals de l'assaig a tracció.....</i>	<i>35</i>
<i>Taula 3.2 Resultats experimentals per al perfil amb perforacions</i>	<i>45</i>
<i>Taula 3.3 Resultats experimentals per al perfil sense perforacions.....</i>	<i>45</i>
<i>Taula 4.1 Magnitud de la imperfecció pels diferents modes de vinclament. Font: [6]</i>	<i>52</i>
<i>Taula 4.2 Deformades per als modes DS i DA obtingudes per al perfil amb perforacions mitjançant la introducció d'imperfecció geomètrica.....</i>	<i>56</i>
<i>Taula 4.3 Resultats numèrics obtinguts per al perfil amb perforacions per a diferents modes de vinclament (DS i DA) i sense imperfecció geomètrica.....</i>	<i>57</i>
<i>Taula 4.4 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions per a diferents modes de vinclament (DS (obert), DS (tancat) i DA) i sense imperfecció geomètrica</i>	<i>58</i>
<i>Taula 4.5 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions (ala més llarga) per als modes DS obert i tancat</i>	<i>62</i>
<i>Taula 4.6 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions (ala inclinada) per als modes DS obert i tancat</i>	<i>63</i>
<i>Taula 4.7 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions (segona aproximació del perfil real) per als modes DS obert i tancat.....</i>	<i>65</i>
<i>Taula 4.8 Resultats numèrics obtinguts per al perfil amb perforacions mitjançant el mètode de les tensions residuals.....</i>	<i>71</i>
<i>Taula 4.9 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions mitjançant el mètode de les tensions residuals.....</i>	<i>71</i>
<i>Taula 5.1 Valors de les àrees dels perfils</i>	<i>79</i>
<i>Taula 5.2 Resultats del càlcul normatiu i comparativa amb els resultats experimentals del perfil amb perforacions.....</i>	<i>80</i>
<i>Taula 5.3 Resultats del càlcul normatiu i comparativa amb els resultats experimentals del perfil sense perforacions.....</i>	<i>80</i>
<i>Taula 6.1 Comparació de les diferents metodologies amb els resultats experimentals per al perfil amb perforacions.....</i>	<i>83</i>
<i>Taula 6.2 Comparació de les diferents metodologies amb els resultats experimentals per al perfil sense perforacions</i>	<i>84</i>

<i>Taula 7.1 Cost intel·lectual del treball.....</i>	<i>89</i>
<i>Taula 7.2 Cost dels assajos experimentals i tècnics de laboratori</i>	<i>89</i>
<i>Taula 7.3 Cost de programari (software).....</i>	<i>90</i>
<i>Taula 7.4 Cost del treball fi de grau.....</i>	<i>90</i>

Glossari

t : Gruix de la xapa

w : Longitud de l'anima del perfil

f : Longitud de l'ala del perfil

L : Longitud del puntal

E : Mòdul de Young

ν : Coeficient de Poisson

G : Mòdul d'elasticitat transversal

f_y : Límit elàstic

f_u : Tensió última

DS : *Distorsional Simètric*

DA : *Distorsional Antimètric*

A_{eff} : Àrea efectiva

$A_{eff,D}$: Àrea efectiva a vinclament distorsional

A_{bru} : Àrea bruta de la secció

P_{ult} : Càrrega última resistent

χ_y : Factor reductor de l'àrea efectiva per a determinar la càrrega última resistent (EN15512)

χ_{min} : Factor reductor mínim entre χ_y i els corresponents modes de vinclament

corresponents a les càrregues crítiques de torsió i flexo-torsió

χ_d : Factor reductor de l'àrea pel mode distorsional (EC3)

$N_{cr,y}$: Càrrega crítica a flexió en l'eix y

$N_{cr,T}$: Càrrega crítica a torsió

$N_{cr,FT}$: Càrrega crítica a flexo-torsió

I_w : Inèrcia d'alabeig (warping)

J : Inèrcia a torsió

I_x, I_y : Inèrcies en l'eix corresponent

i_x, i_y : Radis de gir de l'eix corresponent

y_c : Coordenada en l'eix corresponent del centre de gravetat

y_s : Coordenada en l'eix corresponent del centre d'esforços tallants

y_0 : Distància en l'eix corresponent entre el centre de gravetat i el centre d'esforços tallants

L_{eT} : Longitud efectiva corresponent a la torsió

L_{eF} : Longitud efectiva corresponent a la flexió

$W_{eff,x}$: Moment resistent el l'eix x

$W_{eff,y}$: Moment resistent en l'eix y

γ : Factor d'imperfeció relacionat amb les corbes de vinclament (EN15512)

m_y : Factor corrector del moment (EN15512)

e_x : Excentricitat de la càrrega aplicada en l'eix x

γ_M : Factor de seguretat (EN15512)

Perfil C: Perfil amb copes, perforacions o forats

Perfil SC: Perfil sense copes, perforacions o forats

$\sigma_{cr,s}$: Mínim de la tensió crítica elàstica del mode distorsional pur d'una semionna, amb els seus dos extrems articulats

α : Angle relatiu entre elements estructurats units per qualsevol tipus d'unió

LERMA: Laboratori d'Elasticitat i Resistència de Materials

DRMEE: Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria.

$P_{ult, curta}$: Càrrega última a columna curta.

1. Introducció

1.1. Objectius

Els objectius d'aquest treball fi de grau consisteixen en conèixer la capacitat resistent dels perfils tipus *rack* mitjançant diferents mètodes numèrics, experimentals i analítics, assajats a flexo-compresió.

Finalment, i un cop s'obtinguin tots els resultats, es compararà i s'analitzarà si els mètodes utilitzats són o no adients per al càlcul resistent d'aquest tipus de perfil.

1.2. Abast

Pel que fa referència al càlcul numèric, el treball es limita a adaptar els mètodes i codi de la tesi doctoral de Bonada [6], per poder introduir una excentricitat en l'aplicació de la càrrega. Per a la introducció de les tensions residuals i l'enduriment per deformació s'usen els mètodes explicats a la tesi, sense entrar molt en detall de les diferents metodologies seguides.

En els assajos experimentals, es dissenya una placa que permet la introducció d'excentricitat per a poder sotmetre el puntal a una combinació de compressió i moment flector. L'utilitatge necessari per aplicar l'esforç axil ja va ser utilitzat en la tesi.

Pel que fa al càlcul normatiu, el treball es limita a calcular les prediccions de càrrega resistent mitjançant els paràmetres geomètrics de la secció. El càlcul de les àrees efectives no s'ha dut a terme en aquest treball, simplement s'ha utilitzat el seu valor.

Per últim, en el treball s'elabora un model 3D dels assajos experimentals per tal de poder explicar amb claredat les parts de que consta l'utilitatge necessari per sotmetre el puntal als esforços desitjats. El vídeo confeccionat amb aquest model, es limita a ensenyar les parts del utilitatge i no pretén mostrar els passos seguits per al muntatge d'aquest.

2. Estat de l'art

2.1. Perfils prims d'acer conformats en fred

Els perfils prims conformats en fred són elements estructurals molt utilitzats en la indústria per l'emmagatzematge de palets gràcies a la seva adaptabilitat. Aquestes estructures permeten reduir l'espai d'emmagatzematge, gràcies a la seva capacitat resistent i el seu optimitzat disseny (Fig. 2.1).



Fig. 2.1 Estructura convencional de paletització. Font: [2]

Els elements que habitualment componen aquest tipus d'estructures són: els puntals, els llarguers i les diagonals. Els llarguers són els elements sobre els quals es recolzen els palets i, per tant, suporten directament la càrrega d'aquests. Aquesta càrrega es transmet als puntals, que actuen com a columnes de l'estructura. Per últim, les diagonals són les responsables de donar estabilitat a l'estructura. Són les encarregades d'arriostrar els puntals, per tal que l'estructura pugui resistir càrregues laterals, formant els bastidors (Fig. 2.2 (a)).

Existeixen diverses unions que permeten la unió entre els diferents elements de l'estructura. En primer lloc, hi ha la possibilitat de tenir-ne de cargolades, com la que hi ha entre puntal i placa-terra (Fig. 2.2 (c)) o entre puntal i diagonal (Fig. 2.2 (b)). Altrament, hi ha que utilitzen pestanyes i clips, com acostuma a ser la unió entre puntal i llarguer (Fig. 2.2 (d)). Aquestes unions són possibles gràcies a una sèrie de perforacions uniformement distribuïdes al llarg del puntal, donant l'opció d'escollir la distància entre successius llarguers al llarg de l'estructura.

Així com l'arriostrament dels puntals dóna a l'estructura estabilitat en la direcció dels bastidors, les altres dues unions acaben de donar l'estabilitat necessària en la direcció perpendicular als bastidors, en la direcció del llarguer.

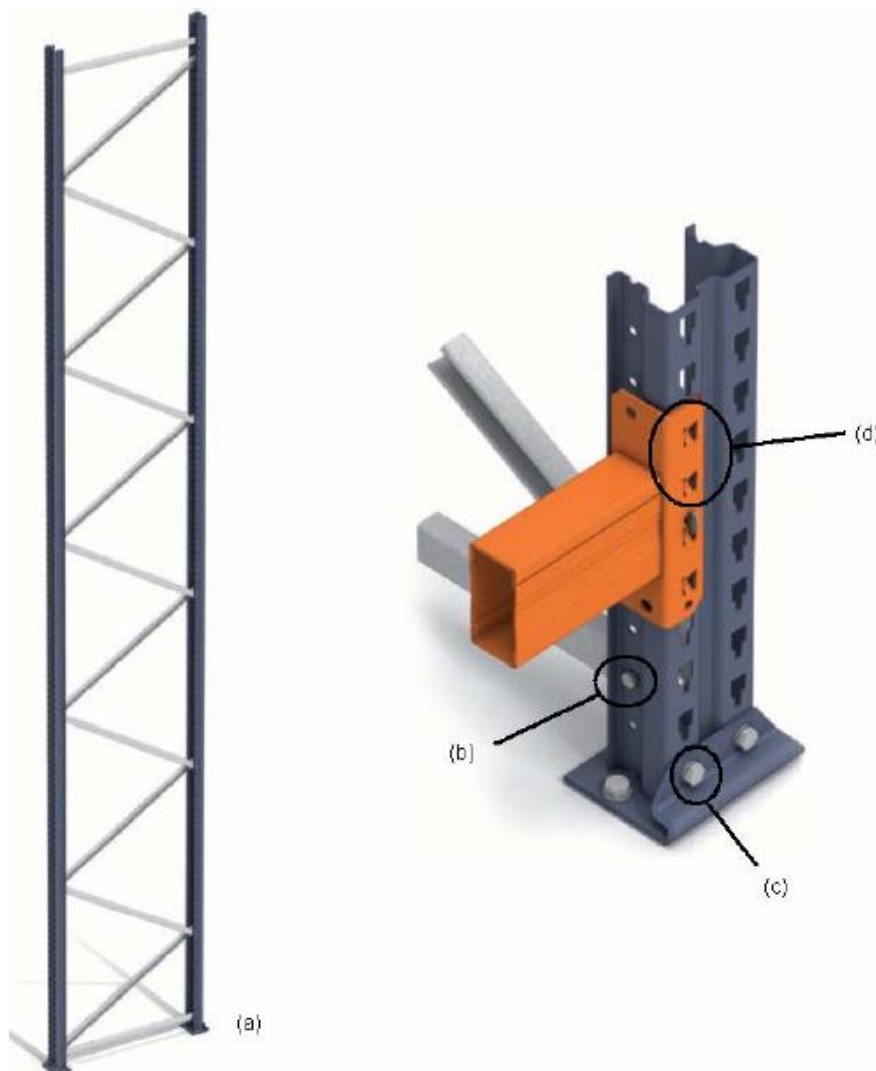


Fig. 2.2 (a) Bastidor d'una estructura convencional de paletització. (b) Unió cargolada entre puntal i diagonal. (c) Unió cargolada entre puntal i placa-terra. (d) Unió per pestanyes entre puntal i llarguer.

Font: [2]

Aquests tipus de perfils acostumen a ser conformats en fred i n'existeixen diferents tipus, depenent del fabricant. Al llarg d'Europa, es fan servir diversos tipus de perfils optimitzats per aconseguir la màxima capacitat resistent, amb l'objectiu de reduir l'espai utilitzat per a l'emmagatzematge de palets. Pel contrari, als Estats Units els perfils utilitzats acostumen a ser d'un únic tipus, en forma de C i amb la mateixa forma de perforació. L'avantatge de tenir només un tipus de perfil, és que es poden muntar estructures per a palets amb materials de diferents proveïdors, cosa que no acostuma a passar en el cas europeu, amb diferents tipus de perfils. La Fig. 2.3 mostra algunes unions puntal-llarguer de diferents estructures metàl·liques.

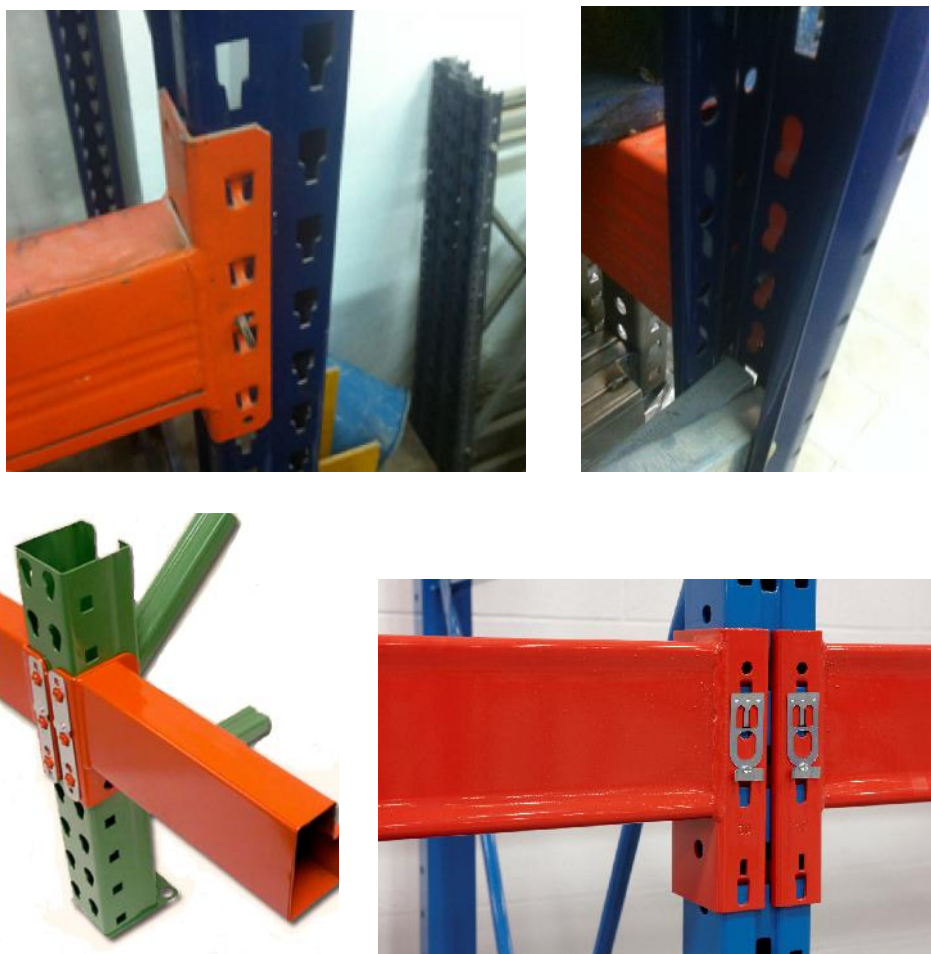


Fig. 2.3 Algunes unions puntal-llarguer

Aquestes estructures poden tenir diferents tipus de fallides segons les causes que les provoquin, com ara la fallida dels llarguers, saturació de les unions (puntal-llarguer o puntal-terra) o per compressió (o flexo-compresió) dels puntals. Per a obtenir més informació sobre la fallida d'aquestes estructures, consultar [6].

2.2. Perfils tipus rack : Parts del perfil.

Els elements estructurals en estudi, els puntals, acostumen a ser perfils prims oberts monosimètrics. La seva forma característica els proporciona el nom de seccions omega o *rack*. Els seus elements bàsics es troben a la Taula 2.1, definicions extretes de [6], i a la Fig. 2.4 .

Part del perfil	Descripció
Ànima (1)	<i>Part plana situada a la base del perfil que conté perforacions per on s'uneix amb el llarguer.</i>
Ala (2)	<i>Part plana situada habitualment en la direcció perpendicular a l'ànima. Conté perforacions, normalment circulars, per connectar el puntal amb les diagonals.</i>
Radis d'acord (3)	<i>Zones de xapa corbada entre les diferents parts planes.</i>
Rigidityzadors (4)	<i>Elements geomètrics situats normalment a l'ànima i l'ala per disminuir la longitud de les zones planes i així reduir l'efecte dels abonyegaments locals.</i>
Llavi (5)	<i>Element pla situat a l'extrem de l'ala orientat en una altre direcció que aquesta. No totes les seccions en tenen.</i>
Perforacions	<i>Presentes en l'ànima i/o l'ala del perfil per tal de garantir la connexió entre elements estructurals</i>
Mòdul (pitch)	<i>Longitud mínima necessària en la direcció longitudinal per definir el patró de perforacions.</i>

Taula 2.1 Descripcions de les parts del perfil tipus rack

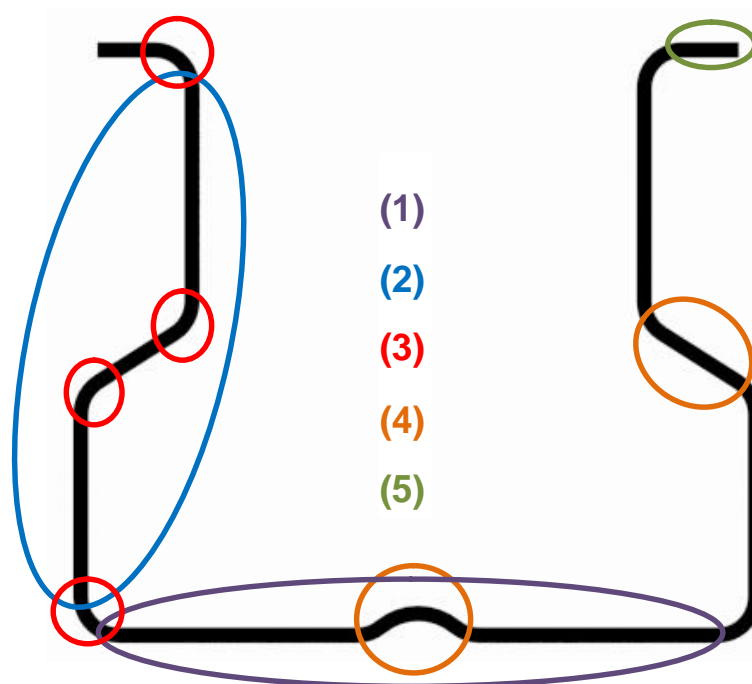


Fig. 2.4 Zones d'una secció rack.

2.3. Unió semirígida puntal-llarguer

Una unió es caracteritza per unir dos elements entre si. Aquesta pot estar sotmesa a diferents esforços, depenent del tipus de la mateixa i distribució de càrregues. Existeixen tres tipus clarament diferenciats. En primer lloc, estan les unions totalment rígides, que es caracteritzen per presentar un valor de moment, mantenint constant l'angle relatiu entre els dos elements units. Oposadament, es pot tenir un valor de moment negligible amb una variació de l'angle relatiu diferent de zero. En aquest cas, es té una articulació. Entremig d'aquests dos casos, existeixen les anomenades unions semirígides. La Fig. 2.5 mostra un gràfic M- , on s'observen les diferents zones que ocupen els tres tipus d'unions. La Fig. 2.6 mostra els tres tipus esmentats.

És habitual considerar una zona per a cada un dels tipus d'unions, ja que no existeixen unions 100 % rígides ni articulacions lliures de fricció.

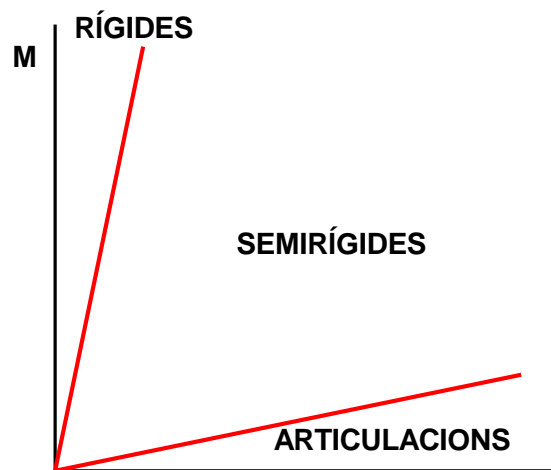


Fig. 2.5 Gràfic M- θ , amb els tres tipus d'unions esmentats.

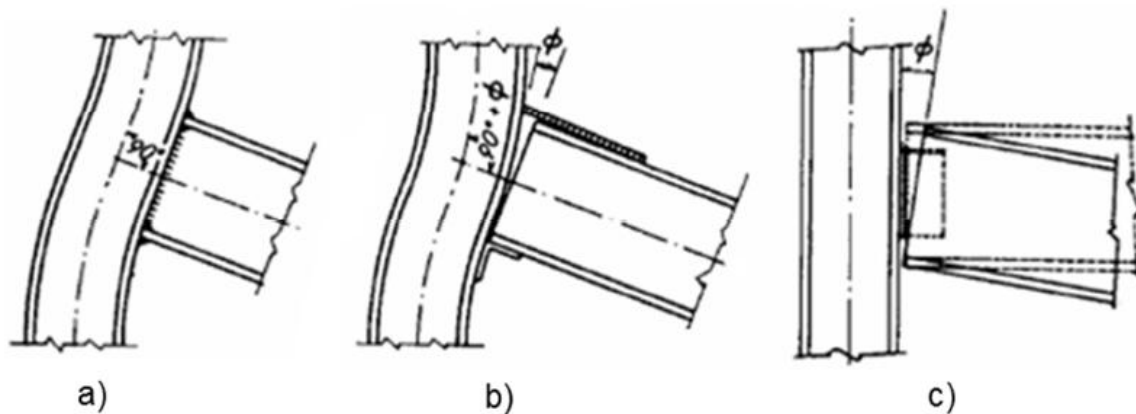


Fig. 2.6 (a) Unió rígida (b) Unió semirígida (c) Unió articulada. Font: [20]

Les unions llarguer-puntal es caracteritzen per ser semirígides. Per tant, aquestes unions en les estructures per a palets estaran sotmeses a un cert moment, que es transmetrà cap als puntals. Per tant, els puntals de l'estructura estaran sotmesos a una combinació entre compressió i moment flector. En el projecte fi de carrera de Fàbrega [20], es poden trobar diversos càlculs amb elements finits que demostren el moment existent en els puntals de l'estructura, com mostra la següent figura (Fig. 2.7):

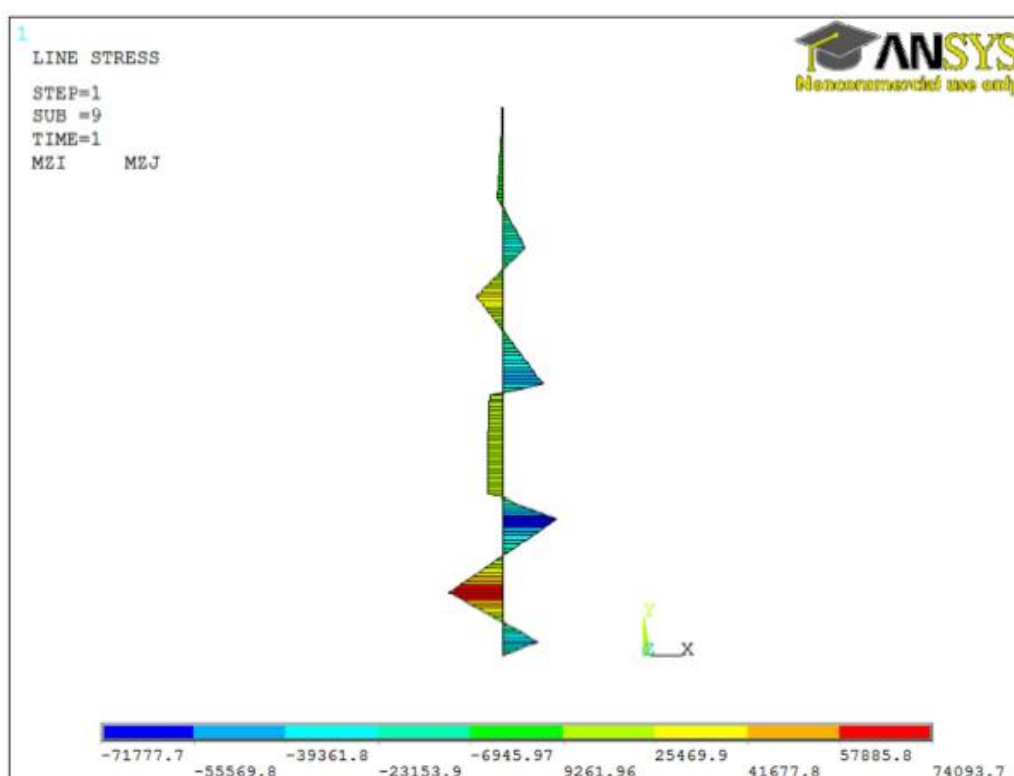


Fig. 2.7 Moment flector resultant, després del càlcul resistent de l'estructura per a palets. Font: [20]

2.4. Fallida dels perfils tipus rack

Els perfils o seccions tipus *rack* quan estan sotmesos a compressió o flexo-compensió pateixen una fallida a vinclament. L'esforç axil augmenta fins que es produeix el col·lapse del puntal. Aquests perfils acostumen a ser molt prims, el que fa que les inestabilitats locals i distorsionals predominin sobre les globals. Però, la predominança d'una o altra inestabilitat ve molt marcada per la longitud del puntal. Les inestabilitats produïdes durant el col·lapse, es poden classificar en tres tipus:

- Vinclament local: en aquest tipus de vinclament es produeix un abonyegament de les parts planes del perfil. És a dir, els nusos de la secció es mantenen immòbils mentre que les parets es deformen (Fig. 2.8).
- Vinclament distorsional: es produeix una deformació de la secció. En aquest vinclament, els nusos de la secció poden desplaçar-se i les parets poden deformar-se. En seccions monosimètriques s'acostuma a diferenciar entre distorsionals simètrics (Fig. 2.9 (a)) i asimètrics (Fig. 2.9 (b)).
- Vinclament global: en el vinclament global es produeix un desplaçament de la

secció, sense que se'n produeixi una deformació seccional. És a dir, els nusos de la secció es traslladen i les parts planes de la secció romanen sense deformar-se. Existeixen tres vies per a que es produeixi vinclament global: flexió (Fig. 2.10 (a)), torsió (Fig. 2.10 (b)) o flexo-torsió (Fig. 2.10 (c)). El mode més crític per aquests perfils és la flexo-torsió ja que, com es diu a [6], *es tracta de seccions de paret prima obertes i monosimètriques i per tant el mòdul a torsió de la secció té un valor molt baix i el centre d'esforços tallants i el centre de gravetat de la secció es troben a diferent posició*.

L'aparició d'un o altre tipus de vinclament, com s'ha comentat anteriorment, ve marcat per la mateixa longitud del puntal. Per a longituds curtes, el vinclament local predomina. Pel contrari, el vinclament global predomina per a longituds elevades. Per a longituds intermèdies apareix el vinclament distorsional. Aquesta classificació, no significa que el canvi entre un tipus de vinclament i un altre es produeixi de manera sobtada, sinó que existeix una zona de transició on conviuen dos d'aquests modes de vinclament. El resultat produït és una combinació d'ambdós modes.

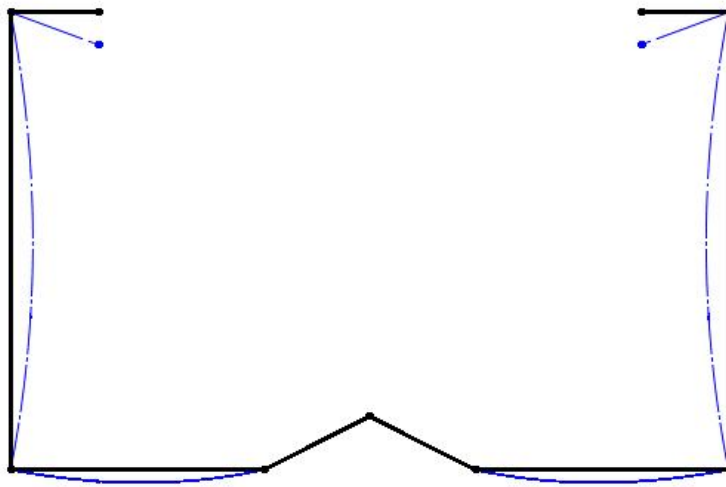


Fig. 2.8 Vinclament local

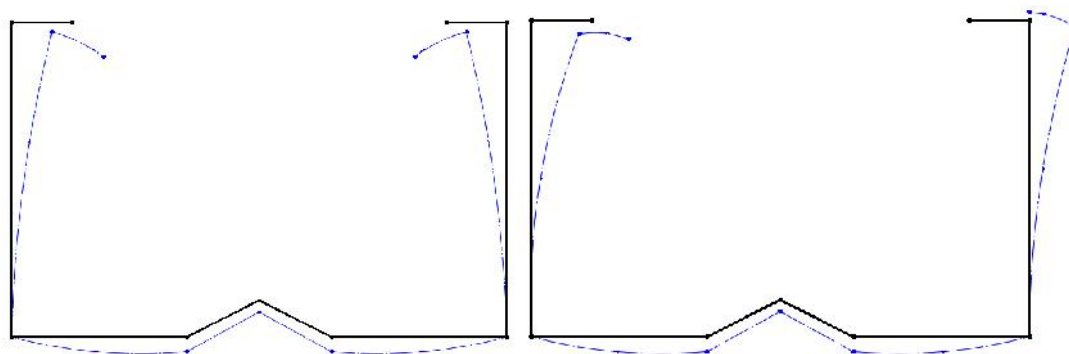


Fig. 2.9 (1) Vinclament distorsional simètric (2) Vinclament distorsional antisimètric.

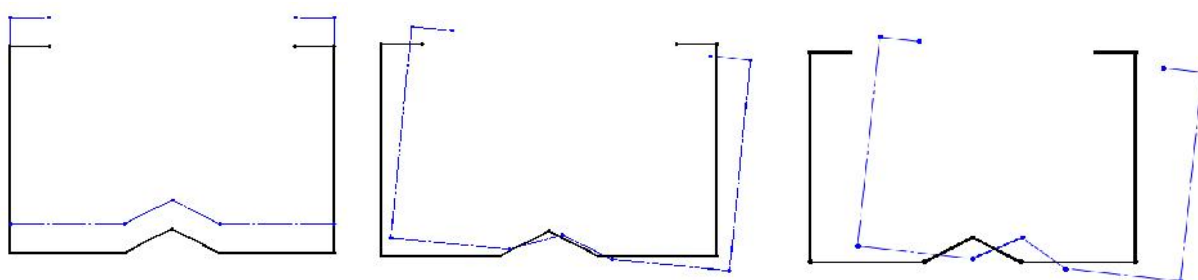


Fig. 2.10 (1) Vinclament global a flexió (2) Vinclament global a torsió (3) Vinclament global a flexo-torsió.

2.5. Càlcul resistent del perfil tipus rack

La capacitat resistent dels perfils tipus *rack* no es pot determinar mitjançant les teories clàssiques com la resistència de materials si es produeix una fallida per abonyegament local o distorsional, ja que una de les seves hipòtesis bàsiques és la no deformació seccional. Actualment, s'apliquen mètodes analítics més complexos com la teoria de plaques, bandes finites, elements finits, teoria de la biga generalitzada, etc. Malgrat això, cada cop s'intenta millorar aquestes teories per tal de millorar el càlcul resistent d'aquests perfils. Alguns d'aquests mètodes analítics es poden trobar en diverses normatives, com l'Eurocodi (EC3, EN15512) o la normativa americana (AISI S100), que proporcionen mètodes per al càlcul de càrrega última que suporten aquests i d'altres tipus de perfils.

Per les longituds escollides en aquest treball, el vinclament predominant és el vinclament distorsional. Diversos estudis sobre aquest tipus de vinclament s'han desenvolupat en els últims anys per tal d'intentar predir millor el seu comportament. Per a més informació consultar [12-18].

2.5.1. Mètode dels elements finits

El mètode dels elements finits és molt utilitzat a l'hora d'obtenir el valor de càrrega última resistent dels perfils prims oberts, afectats pel vinclament. Normalment, el càlcul és divideix en dos passos. El primer, es basa en una anàlisi lineal de vinclament (*eigenbuckling analysis*) necessari per a obtenir els diferents modes de vinclament en que el perfil pot col·lapsar. S'escull un d'aquests modes per definir una forma d'imperfeció geomètrica "fictícia" que inclogui l'efecte de possibles excentricitats de càrrega, imperfeccions geomètriques reals o possibles efectes del procés de conformat (tensions residuals i enduriment per deformació). En l'apartat 4.2, es mostra el criteri escollit per a decidir la amplitud d'aquesta imperfeció. En segon lloc, s'aplica aquesta imperfeció trobada en un càlcul no lineal per obtenir la càrrega última resistent.

Com s'explica a [6], el càlcul lineal proporciona una càrrega superior a la real, ja que assumeix un comportament elàstic i lineal. Aquest càlcul, com s'ha comentat, únicament s'utilitza per a trobar una forma d'imperfeció geomètrica i poder realitzar posteriorment un càlcul no lineal. Per obtenir els modes de vinclament desitjats, s'ha de resoldre l'equació següent (Eq. 2.1):

$$[K][\phi_i] = \lambda_i [G][\phi_i] \quad (Eq. 2.1)$$

on les matrius indicades són:

- $[K]$: Matriu de rigidesa.

- $[\phi_i]$: Vectors propis que defineixen els desplaçaments dels diferents modes de vinclament.

- $[G]$: Matriu de rigidesa tensional (geomètrica).

- λ_i : Valors propis.

Per a resoldre L'Eq. 2.1 es fan servir diversos mètodes matemàtics, com per exemple el Subspace o Block Lanczos.

No existeix una normativa que indiqui els valors que s'han de prendre per a obtenir una imperfecció geomètrica per aquests tipus de perfil. A més a més, utilitzar diferents formes d'imperfecció geomètrica pot donar lloc a valors de càrrega sensiblement diferents. En aquest treball, s'utilitzen els valors presentats en l'apartat 4. Per a més informació, sobre investigacions relacionades amb el càlcul per elements finits, càlculs experimentals i la utilització de la teoria de la biga generalitzada per a modelitzar el comportament dels perfils tipus *rack*, consultar la tesi doctoral de Bonada [6].

És important escollir correctament la forma del mode de vinclament en el càlcul lineal. En general, es pot diferenciar entre DS i DA, com ja s'ha comentat anteriorment. A més a més, es pot diferenciar entre DS obert i DS tancat. En el primer, les ales tendeixen a obrir-se, mentre que en el segon cas succeeix el contrari. Ambdós casos condueixen a unes càrregues de fallida totalment diferents, com s'observa en l'apartat 4. A més a més, la introducció de moment en qualsevol dels dos casos anteriors, pot provocar un quart tipus de fallida en el que una de les ales doblega considerablement més que l'altra a l'hora del col·lapse. Per tant, s'ha de diferenciar aquest cas dels altres, ja que no es pot classificar ni com DS ni DA. Aquests quatre modes de col·lapse, es troben en les Fig. 2.11-2.14 .

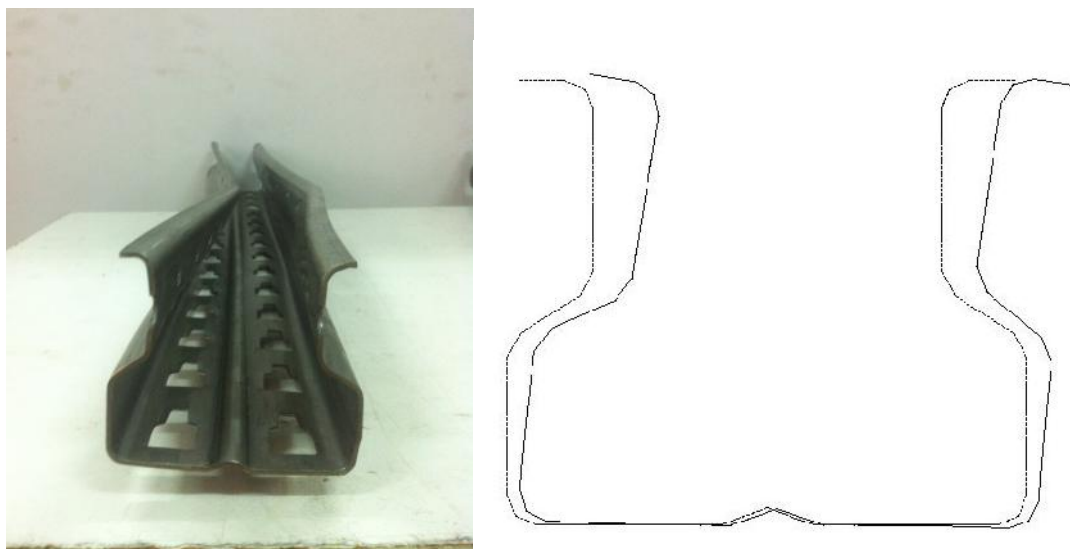


Fig. 2.11 Distorsional antimètric

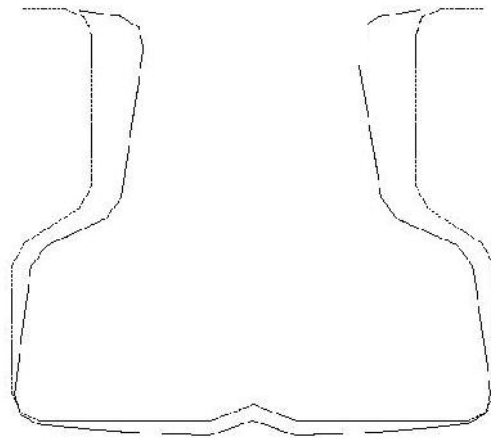


Fig. 2.12 Distorsional simètric (tancat)

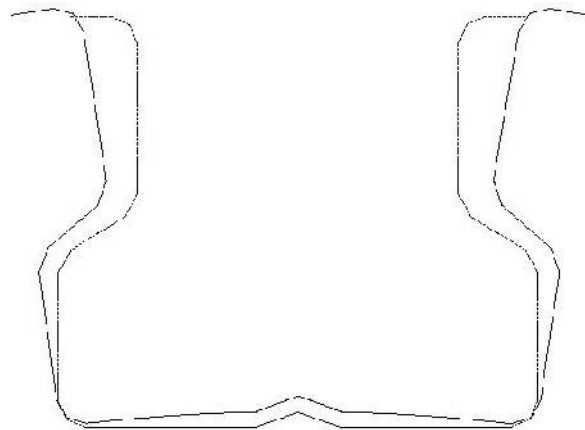


Fig. 2.13 Distorsional simètric (obert)

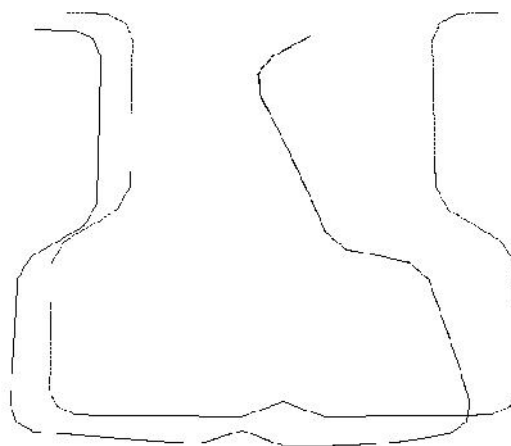


Fig. 2.14 Distorsional amb el col·lapse d'una ala.

2.5.2. Càlcul normatiu

Existeixen diferents normatives que proporcionen un mètode de càlcul per a obtenir el valor de càrrega última per a perfils tipus *rack*, ja estiguin sotmesos a compressió o flexo-compresió. Per exemple, es poden utilitzar l'Eurocodi (EC3) o la normativa americana (AISI S100), que proporcionen dos metodologies diferents per al càlcul resistent. Els mètodes de càlcul es basen en la resolució d'una equació principal, dintre de la qual hi ha diversos paràmetres que depenen de característiques geomètriques del perfil en qüestió. Per exemple, l'equació a resoldre en el cas de l'Eurocodi és la següent (Eq. 2.2):

$$\frac{N_{Sd}}{\frac{\chi_{min} A_{eff,D} f_y}{\gamma_M}} + \frac{k_y M_{y,Sd}}{\frac{W_{eff,y} f_y}{\gamma_M}} \leq 1 \quad (Eq. 2.2)$$

on es pot observar que existeix una part de l'equació referent a la compressió (part esquerra) i una altra referent a la flexió (part dreta). L'equació conté una sèrie de paràmetres geomètrics que s'explicaran posteriorment, en l'apartat 5.

2.6. Tensions residuals i enduriment per deformació deguts al procés de fabricació dels perfils

Els perfils primers tipus *rack* habitualment són conformats en fred, ja que són processos que requereixen menys temps i són més flexibles. La metodologia més utilitzada per fabricar aquests perfils és el *roll-forming*. Aquest, és un procés continu de doblat de xapa que fa servir una sèrie de rodets que van donant la forma desitjada, al llarg d'un conjunt d'estacions (Fig. 2.15). Aquest procés permet fabricar perfils a una alta velocitat i conformar materials d'alta resistència.

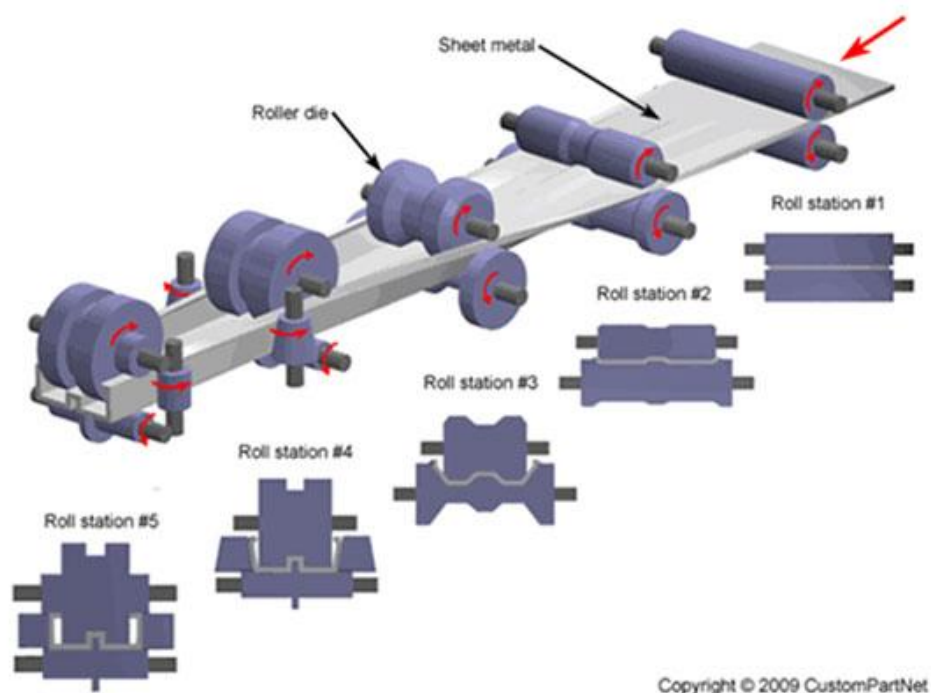


Fig. 2.15 Rodets d'un procés de roll-forming. Font: [21]

El disseny de les diferents etapes de doblegat és molt important, ja que determinarà la qualitat final del perfil obtingut. Si el procés es realitza amb poques etapes, el més possible és que el perfil final presenti una sèrie de fissuracions. Si el procés es realitza amb un nombre excessiu d'etapes, el procés resulta inviable per dues raons. El gran nombre d'etapes elevarà el cost de la instal·lació, a més d'elevar l'ocupació de l'espai, dificultant la construcció de la línia de conformat.

Les diferents estacions de rodets van provocant grans deformacions plàstiques sobre el material, a mesura que aquest va passant per a cada una d'aquestes. Aquestes deformacions són les causants de les tensions residuals i de l'enduriment per deformació presents en el perfil després del procés de conformat. El límit elàstic del material incrementa principalment en les zones que pateixen una plastificació major, com ara els radis d'acord. Aquest fet produeix en aquestes zones una disminució del gruix.

A [6], es mostren diversos mètodes per obtenir les tensions residuals i l'enduriment per deformació per aquests tipus de perfil, mitjançant assajos experimentals i simulacions numèriques. Primerament, es van fan servir galgues extensiomètriques i assajos a tracció, respectivament. Els resultats obtinguts, es mostren a les taules 2.2 i 2.3. Les figures 2.16 i 2.17, mostren on es van col·locar les galgues extensiomètriques i de quines zones es van obtenir les provetes, respectivament.

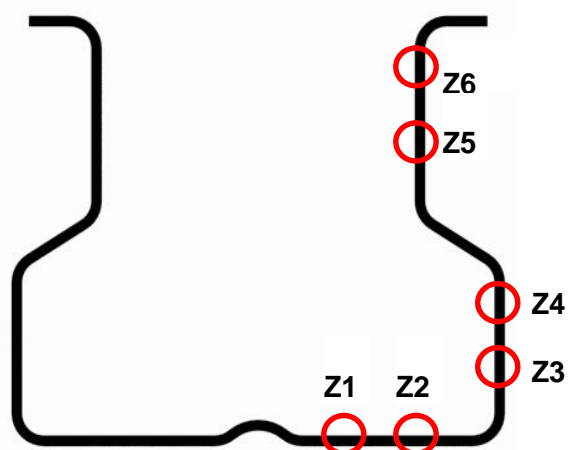


Fig. 2.16 Zones on es van col·locar les galgues extensiomètriques per obtenir les tensions residuals

Zones	Tensió de flexió (% f_y)	Tensió de Membrana (% f_y)
Z1	30,6%	4,8%
Z2	37,6%	7,9%
Z3	16,15%	8,4%
Z4	10,75%	16,8%
Z5	13,3%	-16,92%
Z6	-13,84%	-12,9%

Taula 2.2 Valor de les tensions residuals de flexió i membrana obtingudes experimentalment.

Font: [6]

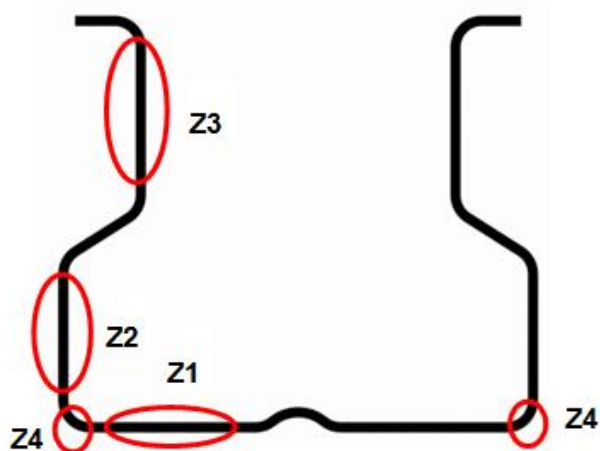


Fig. 2.17 Zones on es van extreure les provetes de les parts planes

Mostra	Zona	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	Bobina	424,0	486,0
2	Bobina	429,3	492,6
3	Bobina	427,5	495,4
4	Bobina	434,8	497,5
5	Bobina	433,2	496,2
6	Z1	422,5	494,1
7	Z1	422,9	482,2
8	Z1	428,1	492,4
9	Z2	433,8	491,2
10	Z2	429,5	494,5
11	Z2	414,7	479,3
12	Z3	429,9	502,8
13	Z3	428,0	497,5
14	Z3	416,8	490,6
14	Z4	486	506
16	Z4	500	527
17	Z4	510	521
18	Z4	477	510
19	Z4	478	510
20	Z4	492	530

Taula 2.3 Valors del límit elàstic i tensió última obtinguts en els assajos a tracció. Font:[6]

En segon lloc, es va fer servir un programa anomenat COPRA per a realitzar una simulació completa del procés de fabricació dels perfils, amb i sense perforacions. Aquest programa s'especialitza per al càlcul, mitjançant elements finits, del procés de perfilat. El model que es va emprar per al càlcul es mostra en la figura següent (Fig. 2.18):

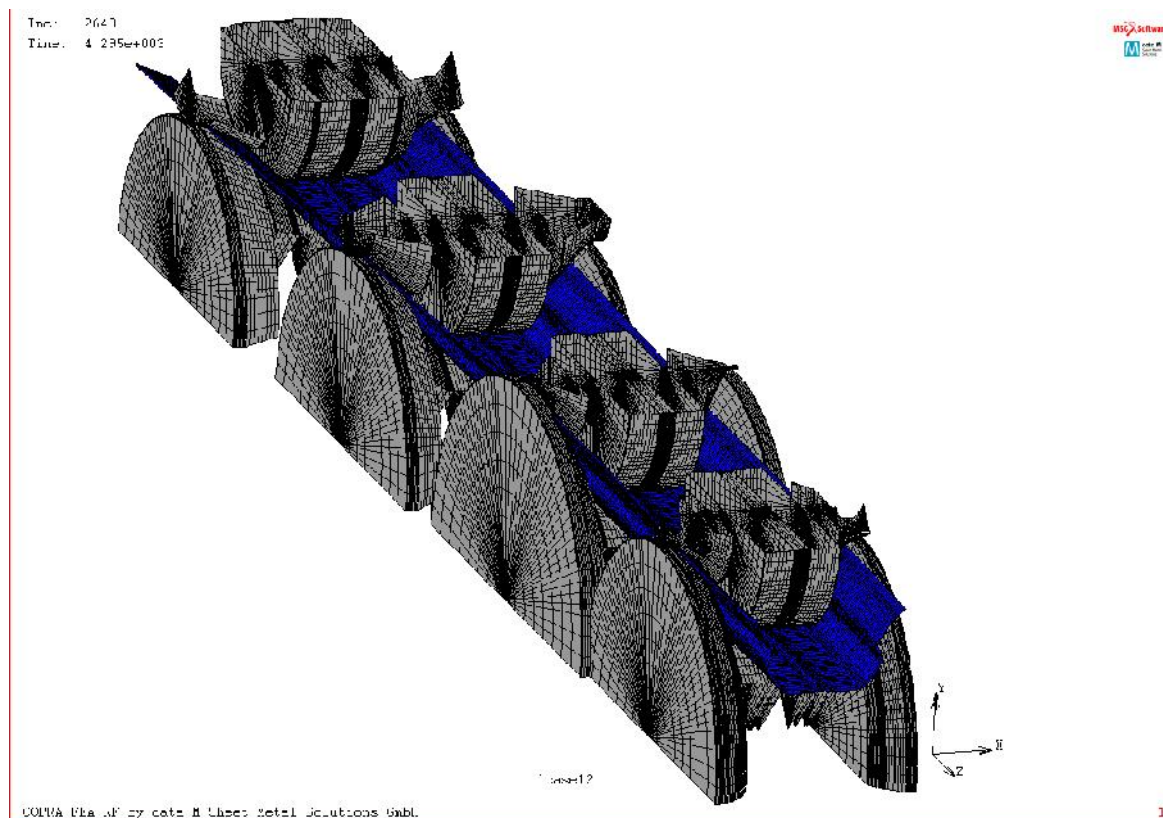


Fig. 2.18 Model d'elements finits del procés de conformat. Font: [6]

A l'apartat 4.5.1, es mostra el patró de tensions residuals utilitzat en el model d'ANSYS. Aquest s'obté mitjançant diversos mètodes, diferents per els dos tipus de perfil. A més a més, s'explica com s'ha introduït l'enduriment per deformació en el model d'ANSYS. Per a més detalls del procés de conformat, com les seves etapes o els possibles efectes derivats o els resultats de la simulació del procés de conformat, consultar [6].

3. Assaig experimental a flexo-compressió

Els resultats experimentals obtinguts, necessaris per a la realització d'aquest treball fi de grau, han estat realitzats entre gener i febrer del 2015.

3.1. Secció analitzada

El perfil analitzat pertany a un model comercial existent. Per motius de confidencialitat no es revela ni el nom comercial del puntal ni totes les característiques geomètriques. El perfil es mostra a la Fig. 3.1. En els assajos s'ha fet servir el mateix perfil amb i sense perforacions.

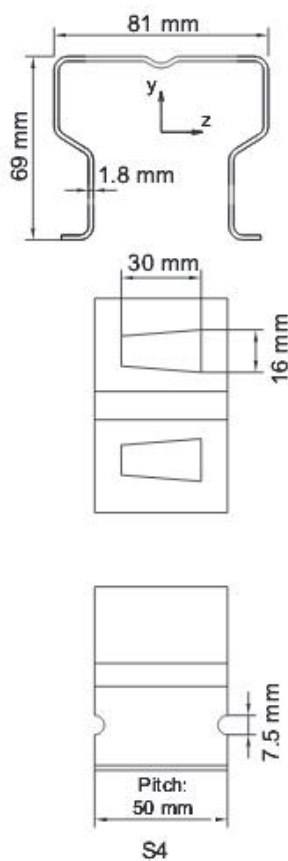


Fig. 3.1 Geometria del perfil assajat. Font: [3]

3.2. Característiques del material

Per tal de determinar les característiques materials de l'acer, s'han extret diverses provetes de les parts planes dels puntals disponibles. Degut a les perforacions, no és possible extreure el material de les mateixes zones per als dos tipus de perfil (Fig. 3.2).

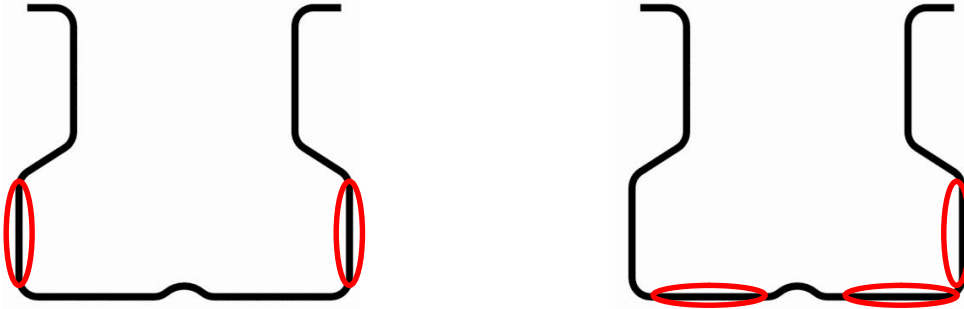


Fig. 3.2 Zones d'on s'han extret les provetes per al perfil amb i sense perforacions, respectivament

Amb les provetes obtingudes, s'han realitzat diversos assajos a tracció per tal de determinar les característiques de l'acer dels puntals (Fig. 3.3), obtenint així el límit elàstic i la tensió última, seguint la normativa UNE-EN-10002-1 [4]. Els resultats obtinguts es mostren a la taula 3.1 i a la Fig. 3.4 i 3.5.



Fig. 3.3 Assaig a tracció de les provetes extretes dels puntals. Font: [6]

Perfil	ΔL (%)	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²
Amb perforacions	21,875	505,6	426,6
	13,125	491,7	409,5
	23,75	510,2	425,3
Mitjana	-	502,5	420,5
Sense perforacions	21,25	490,7	418,9
	21,25	493,3	427,5
	22,5	500,6	434,0
Mitjana	-	494,9	426,8

Taula 3.1 Resultats experimentals de l'assaig a tracció

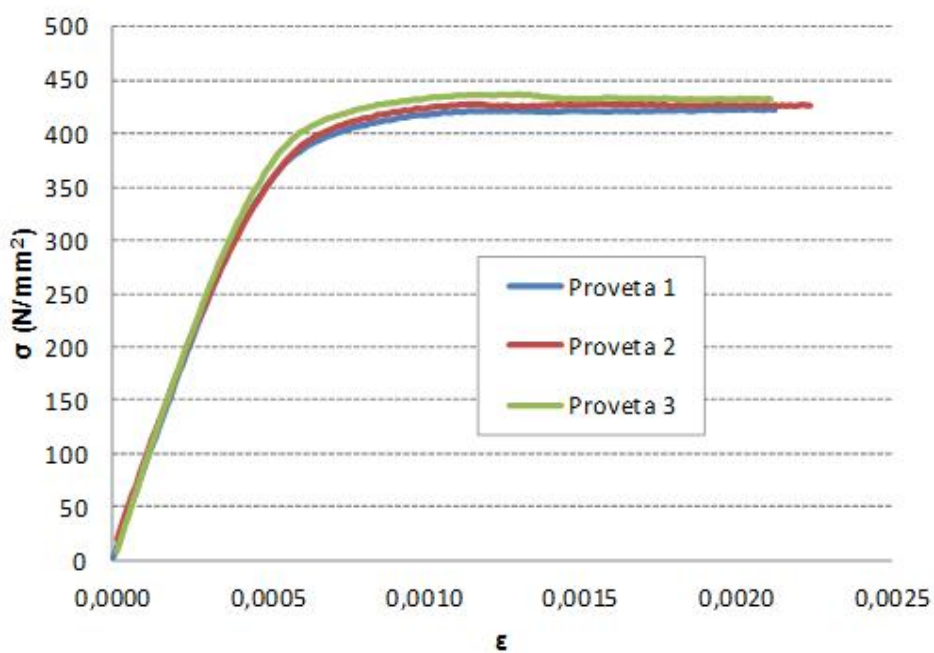


Fig. 3.4 Assaig a tracció del perfil sense perforacions

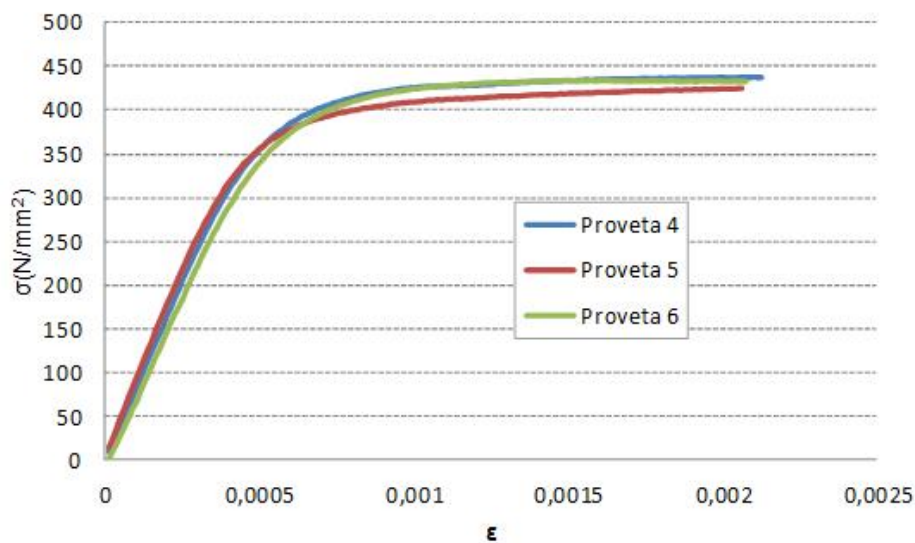


Fig. 3.5 Assaig a tracció del perfil amb perforacions

Els resultats obtinguts a la Taula 3.1 mostren una diferència, pel que fa al límit elàstic, lleugerament superior entre un i altre perfil. Per tant, a partir d'aquest moment, es considerarà un únic límit elàstic per a qualsevol dels dos perfils igual a 423 N/mm^2 .

3.3. Muntatge experimental

Els assajos experimentals es realitzen al LERMA (Laboratori d'Elasticitat i Resistència de Materials), de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. El muntatge proporciona tres condicions de contorn als perfils assajats: la restricció de la torsió al voltant de l'eix longitudinal, l'articulació de la flexió i una deformació seccional nul·la dels extrems. S'utilitza un cilindre hidràulic, amb capacitat per aplicar 250 kN i que es controla manualment, per a la realització del assajos.

Per tal d'aclarir com s'ha realitzat el muntatge i de quines parts consta, s'ha realitzat un model 3D amb el programes Blender, versió 2.72b, i SolidWorks 13. Aprofitant aquesta eina, s'ha confeccionat un vídeo que ensenya detalladament tot el muntatge. A la Fig. 3.6 es mostra una visió general d'aquest model.

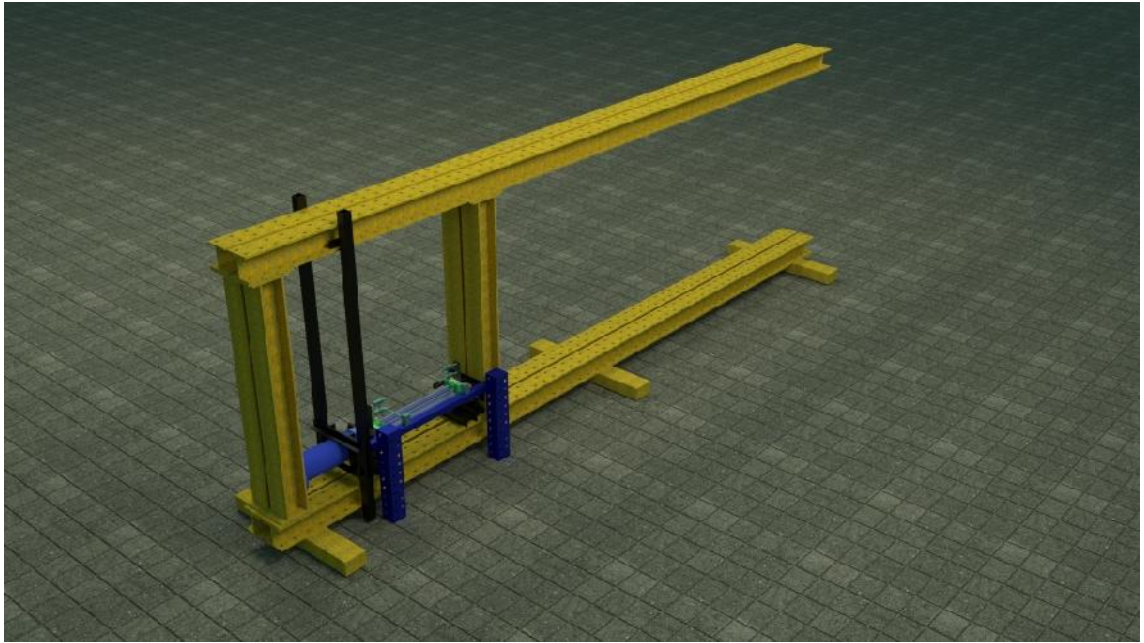


Fig. 3.6 Model 3D del muntatge experimental

3.3.1. Utilatge de compressió

Per a la realització dels assajos, s'ha requerit pràcticament el mateix utilatge utilitzat a [6] , on s'assajaven els puntals a compressió pura. Aquest consta de dues plaques de 30mm de gruix (Fig. 3.7), que subjecten els extrems del puntal, evitant que la secció es deformi.

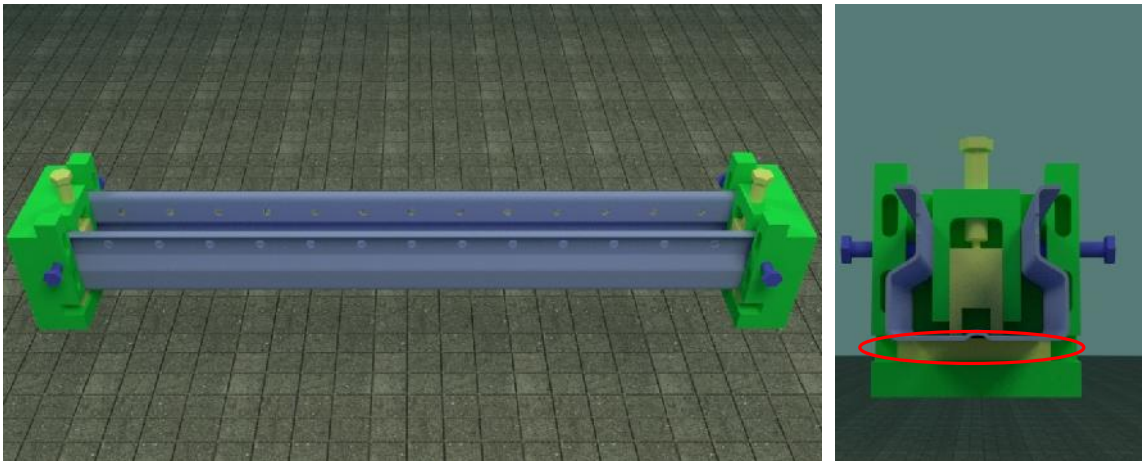


Fig. 3.7 Unió del puntal amb l'utilatge de compressió. Placa 10,5-12,5 mm encerclada en vermell.

Per tal d'alinejar el centre de gravetat efectiu del perfil amb el punt d'aplicació de la càrrega en la direcció vertical, es fan servir unes petites plaques (Fig. 3.7) de 10,5 i 12,5 mm pels perfils amb i sense forats, respectivament.

3.3.2. Disseny i confecció d'una placa auxiliar

Per tal de poder assajar el puntal sotmès a compressió i flexió de forma simultània, s'ha dissenyat unes plaques específiques d'uns 15mm d'ample. Cada una d'aquestes plaques va col·locada en uns dels extrems. La seva funció és la de permetre a les plaques anteriors desplaçar-se en la direcció horitzontal, treballant com unes guies. D'aquesta manera s'aconsegueix una certa excentricitat de la càrrega per poder aplicar un moment constant al llarg del puntal. Les plaques dissenyades es poden veure a la Fig. 3.8 .

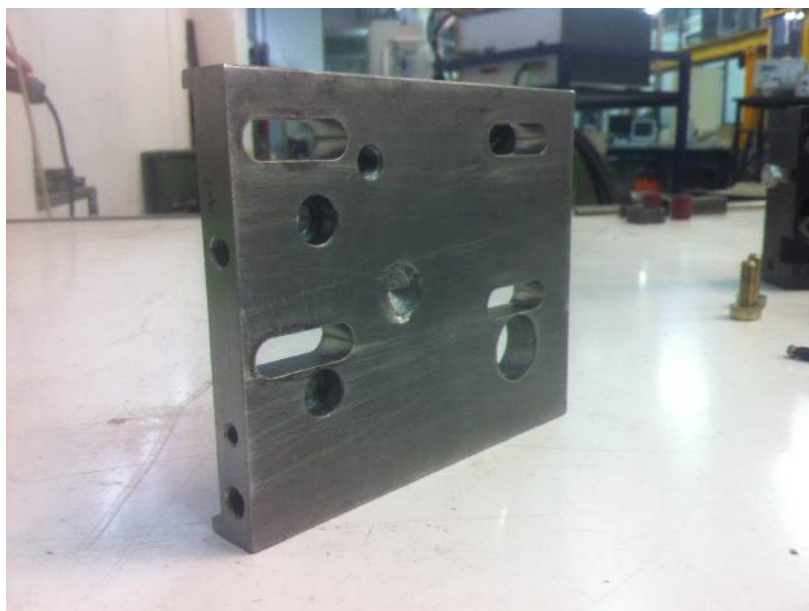


Fig. 3.8 Placa dissenyada per aplicar excentricitat a la càrrega

Les dues plaques van ser construïdes a partir d'una placa usada amb un gruix superior a 15mm. Per a fer la guia, es va fresar la part central uns quants mil·límetres deixant els extrems intactes. A més a més, es van fer els forats per als cargols que permeten acoblar el mecanisme. Ambdues van ser confeccionades amb els plànols que es troben a l'ANNEX E.

A la Fig. 3.9 es mostra la unió entre el puntal i les diferents plaques esmentades abans, la que fixa els extrems del perfil i la que permet aplicar excentricitat a la càrrega.

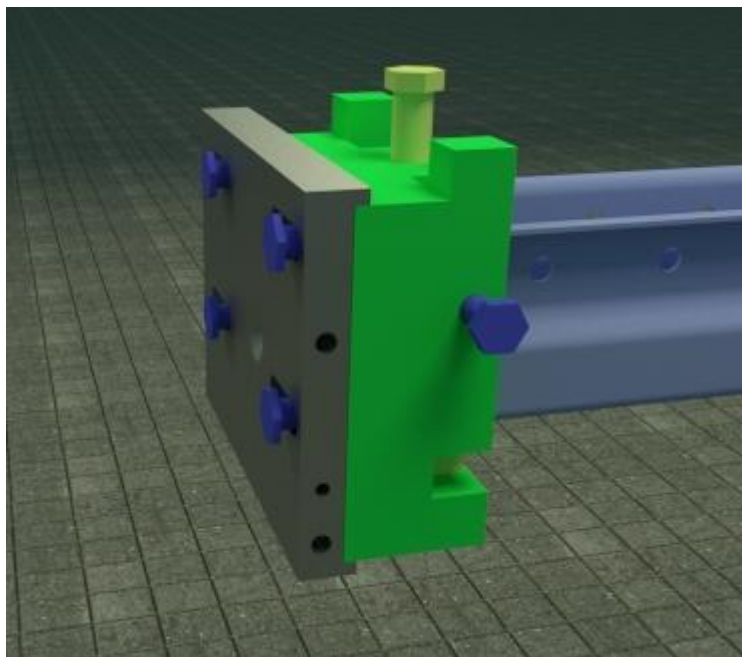


Fig. 3.9 Unió del puntal amb les plaques de subjecció

3.3.3. Banc de càrregues

Un cop el perfil està subjectat per les plaques que permetran sotmetre'l a les condicions d'estudi, aquest es col·loca al banc de càrregues amb uns suports que restringeixen la torsió, recolzats en unes guies (Fig. 3.10). D'aquesta manera el puntal es pot desplaçar en la direcció axial i perpendicular, per acabar d'ajustar-lo abans d'assajar. Cal d'estacar que els suports on recolza, en color taronja a la Fig. 3.10, han d'estar alineats amb el centre de la bola, per tal d'evitar moments innecessaris que falsegin les mesures experimentals i canviïn les condicions d'estudi desitjades.

A més, és necessari que les boles, que permeten aplicar la càrrega i estan cadascuna situada en un dels extrems, encaixin perfectament en la cavitat dissenyada en la placa de 15mm per garantir un bon acoblament, com es pot veure a la Fig. 3.11 .

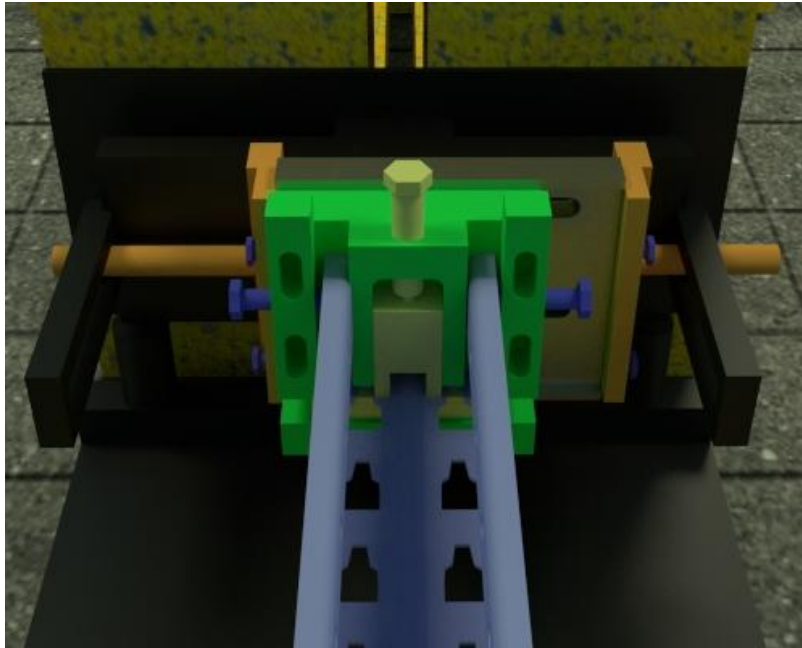


Fig. 3.10 Detall unió del utillatge que subjecta el puntal i el banc de càrregues, condicions de contorn

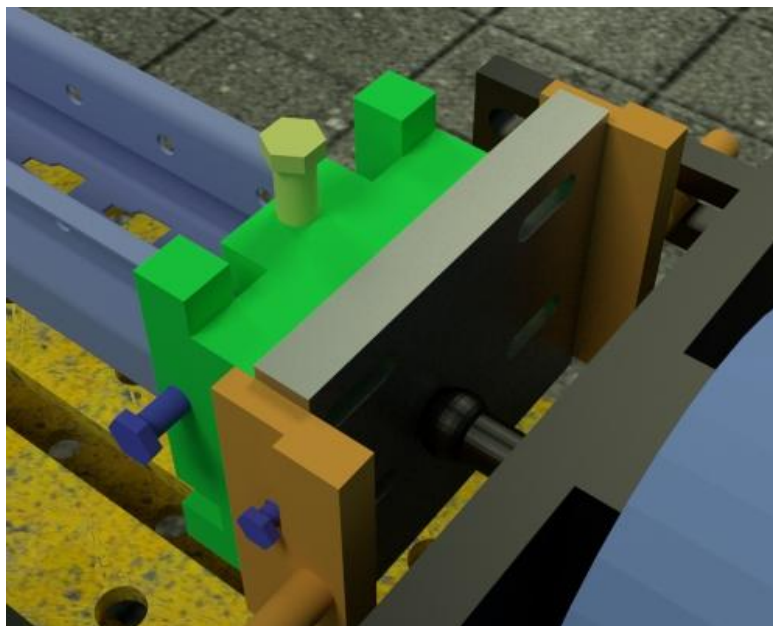


Fig. 3.11 Detall acoblament de la bola del cilindre hidràulic

3.3.4. Punt d'aplicació de la càrrega

Com ja s'ha esmentat anteriorment, és essencial conèixer el centre de gravetat efectiu per tal de començar a realitzar els assajos. Aquest s'obté mitjançant assaigs a columna curta (Fig. 3.12), segons estableix la normativa europea EN 15512 [5]. En aquest cas, aquests punts es troben sobre l'eix de simetria a 29,5 i 27,5 mm de la base per al perfil amb i sense perforacions, respectivament (Fig. 3.13).

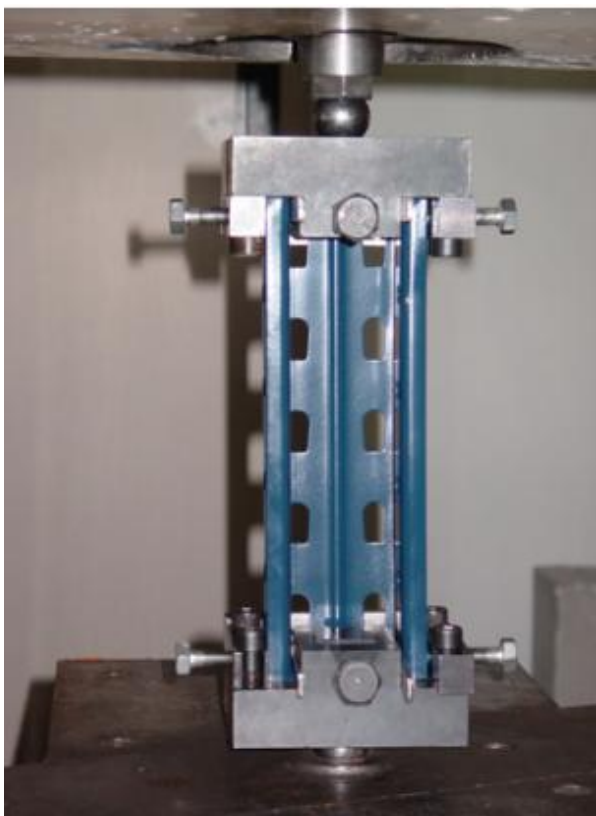


Fig. 3.12 Detall de l'assaig a columna curta per a l'obtenció del centre de gravetat efectiu. Font:[1]

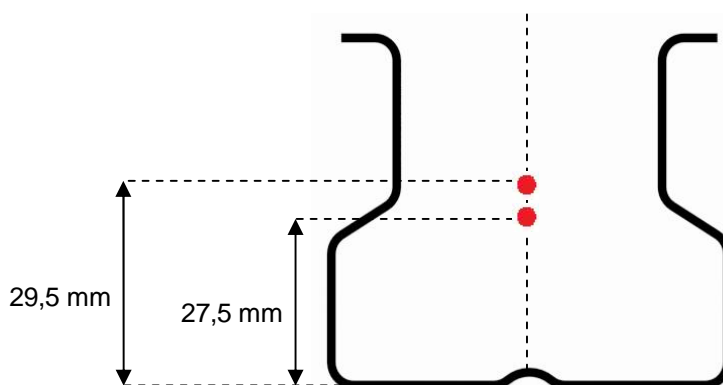


Fig. 3.13 Centre de gravetat efectiu per ambdós perfils

3.3.5. Captadors de desplaçament i cèl·lula de càrrega

Per tal de conèixer el desplaçament dels extrems del puntal en la direcció axial, es col·loca una xapa prima d'acer endarrere de cada una de les plaques de 15 mm, mitjançant una sèrie d'imants. Un cop s'han col·locat correctament, es posicionen dos captadors en cada una d'aquestes plaques. Això és necessari perquè no es pot col·locar un captador per cada costat just sobre l'eix de càrrega. Tot això, es pot observar a la Fig. 3.14 .

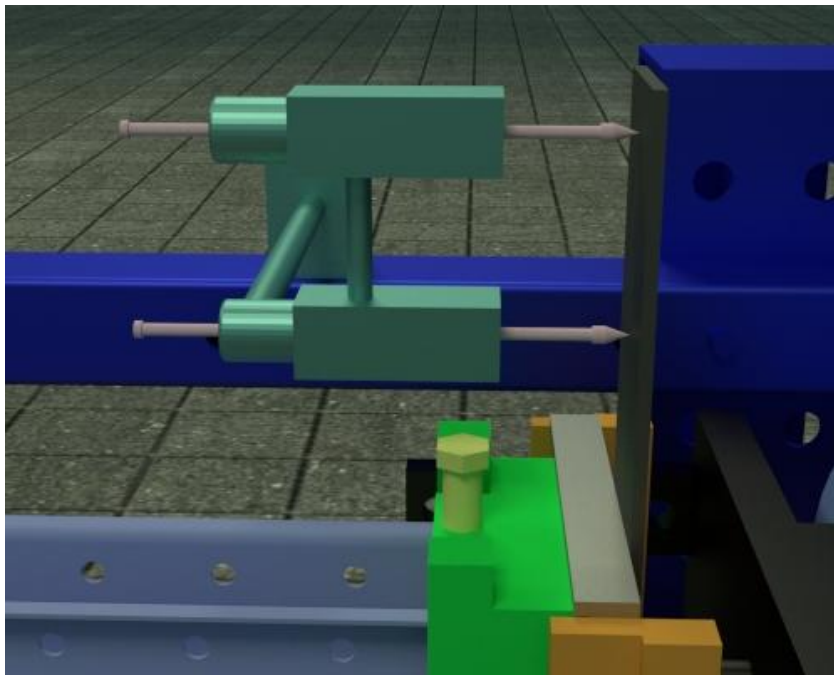


Fig. 3.14 Detall de la col·locació dels captadors per mesurar el desplaçament longitud al del puntal durant l'assaig

Pel que fa referència al desplaçament en la direcció axial, es col·loquen 4 sensors de desplaçament, tal com mostra la Fig. 3.15 . És important orientar-los de manera que siguin perpendiculars a les xapes en les que fan contacte. A més a més, es necessita un cèl·lula de càrrega per conèixer la càrrega aplicada al puntal en kN.

L'aspecte real que presenta el muntatge experimental es pot veure a la Fig. 3.16 i Fig. 3.17. Per obtenir més informació sobre el muntatge experimental a compressió és recomanable consultar la documentació de Roure et al. [1] i Casafont et al. [3] .

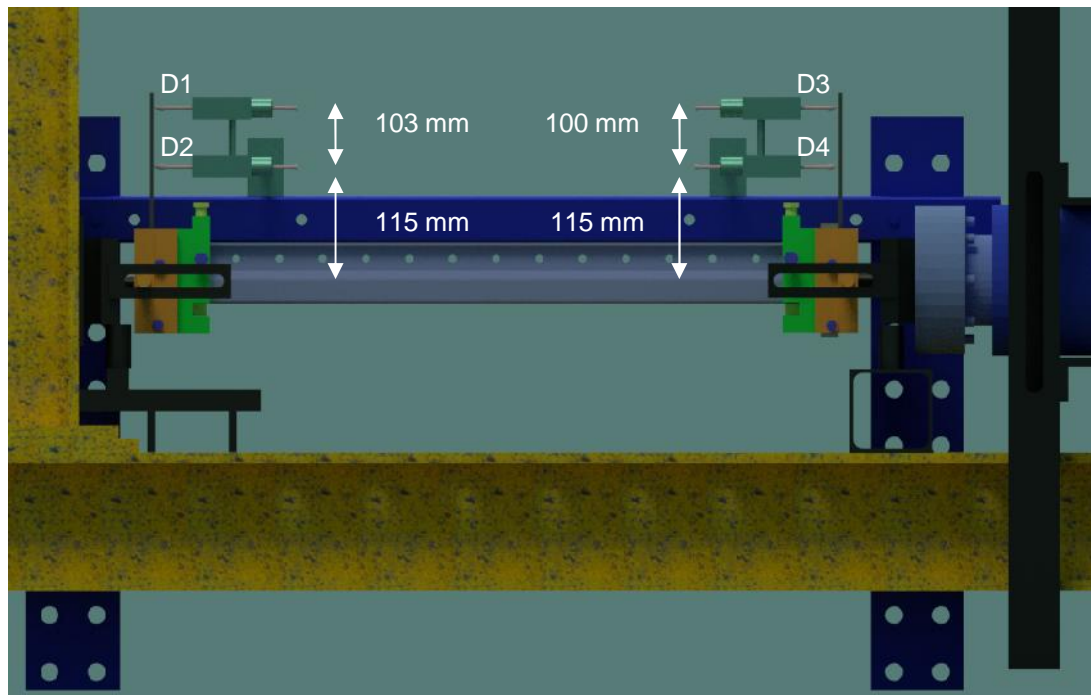


Fig. 3.15 Posició dels captadors de desplaçament en el muntatge experimental



Fig. 3.16 Muntatge per l'assaig experimental a flexo-compresió

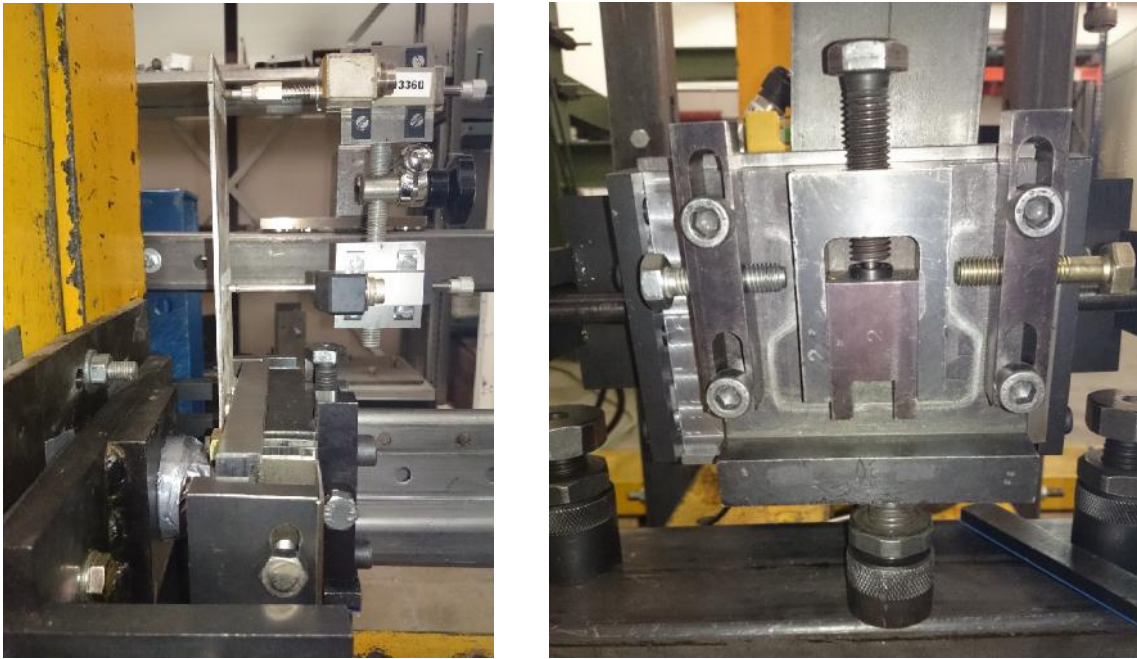


Fig. 3.17 Detall de la col·locació dels captadors de desplaçament i de la unió puntal-utillatge

Com ja s'ha comentat, els puntals estan sotmesos a dos esforços alhora: compressió i flexió. La component més important és la primera, ja que el material emmagatzemat pot arribar a ser molt pesat. Malgrat això, és possible que la component flectora pugui contribuir en un 20 o 30% dels esforços als quals el puntal està sotmès. Aproximadament, amb la normativa Europea EN15512, això suposa descentrar la càrrega uns 10-20mm. Per tant, el puntal serà assajat des del centre de gravetat fins a uns 20mm d'excentricitat, amb una diferència de 5mm entre cada una d'elles.

3.4. Resultats

S'han assajat tres perfils per a cada una de les diferents excentricitats. Per falta de material del perfil sense forats només s'han pogut assajar dos cops algunes excentricitats. Els valors de la càrrega última, el mode de fallida i la codificació de cada un dels perfils es poden consultar a les Taules 3.2 i 3.3 .

Els diferents modes de fallida possibles es poden classificar en 4 tipus: distorsional simètric (1), distorsional asimètric (2), flexió (3) i distorsional on es produeix el col·lapse d'una ala (4) .

Excentricitat (mm)	Mostra	P _{ult} (kN)	Tipus de fallida	Mitjana
0	SC0.1	116	1	117,59
	SC0.2	122	1	
	SC0.3	114,77	2	
5	SC5.1	101,44	1	102,26
	SC5.2	99,39	1	
	SC5.3	105,94	1	
10	SC10.1	87,66	1	89,43
	SC10.2	91,62	1	
	SC10.3	89,20	1	
15	SC15.1	78,10	1-4	76,74
	SC15.2	74,40	1-4	
	SC15.3	77,73	1-4	
20	SC20.1	70,93	1-4	71,67
	SC20.2	71,53	1-4	
	SC20.3	72,56	4	

Taula 3.2 Resultats experimentals per al perfil amb perforacions

Excentricitat (mm)	Mostra	P _{ult} (kN)	Tipus de fallida	Mitjana
0	C0.1	143,92	1	142,80
	C0.2	141,67	1	
	-	-	-	
5	C5.1	129,13	1	131,98
	C5.2	134,82	1	
	-	-	-	
10	C10.1	121,66	4	119,85
	C10.2	116,32	1-4	
	C10.3	121,58	1	
15	C15.1	106,61	4	105,89
	C15.2	104,47	4	
	C15.3	106,59	4	
20	C20.1	94,62	4	93,34
	C20.2	92,05	4	
	-	-	-	

Taula 3.3 Resultats experimentals per al perfil sense perforacions

3.4.1. Tipus de fallida dels perfils assajats

Un cop assajats els perfils, s'ha observat que els puntals amb i sense perforacions tenen un patró diferent a l'hora de col·lapsar. En la majoria de casos, els perfils amb forats col·lapsen mitjançant un mode de fallida distorsional simètric tancat, en canvi, en la majoria de perfils sense forats el mode DS és obert. Aquest fet es pot observar a la Fig. 3.18. A continuació, es mostren també dues imatges de la fallida de dos puntals amb valors oposats d'excentricitat aplicada, 0 i 20mm, en les figures 3.19 i 3.20 respectivament, muntats en el banc de càrregues.



Fig. 3.18 Perfils assajats, amb i sense perforacions respectivament

També es pot observar que, a mesura que s'augmenta l'excentricitat de la càrrega, hi ha una ala que es doblega exageradament més que l'altre. Si més no, hi ha sempre una ala que es doblega abans que l'altre, encara que després l'altre també ho faci com a conseqüència de que el perfil ja ha col·lapsat. Aquest fet es pot observar en els vídeos gravats durant algun dels assajos, disponibles en el CD adjuntat.

Aquest fet és conseqüència directa de l'excentricitat aplicada. A mesura que augmenta, la càrrega aplicada es superior en una de les dues ales, provocant que aquesta deformi abans.



Fig. 3.19 Fallida del puntal sense perforacions amb 0mm d'excentricitat aplicada

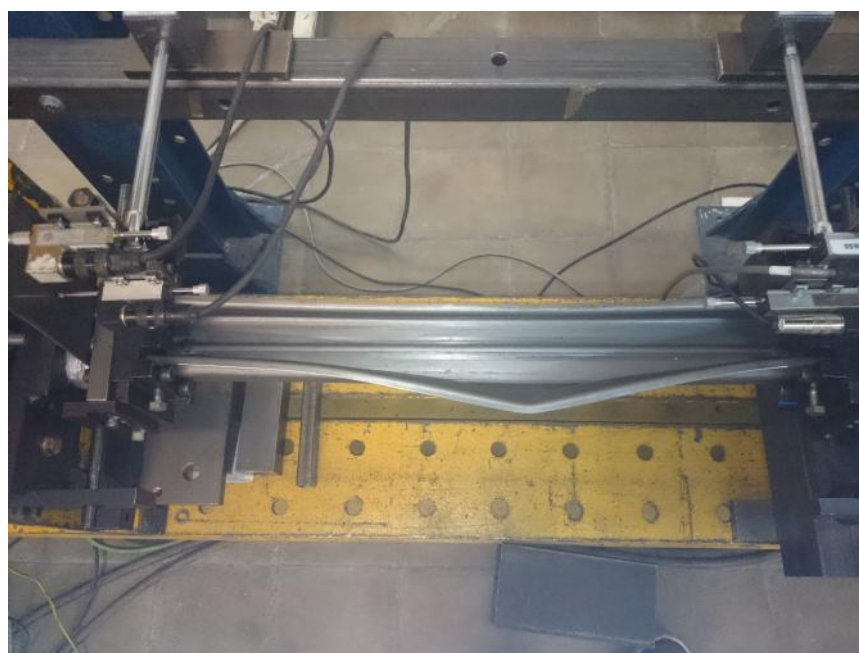


Fig. 3.20 Fallida del puntal sense perforacions amb 20mm d'excentricitat aplicada

3.4.2. Gràfiques força-desplaçament dels assajos realitzats

Les mesures obtingudes mitjançant els captadors esmentats anteriorment, permeten representar la força enfront al desplaçament axial del perfil. La força axial aplicada s'obté directament de la cèl·lula de càrrega. En canvi, el desplaçament axial obtingut correspon al desplaçament dels punts D1, D2, D3 i D4 mostrats a la Fig. 3.15. Coneguts dos punts d'una de les seccions dels extrems, i suposant una deformació lineal de la xapa que contacta amb els captadors, s'obté el desplaçament del centre de gravetat d'aquesta secció. Finalment, es resten aquests dos valors per a obtenir l'escurçament total del puntal.

Aquest últim procediment és necessari, ja que la secció oposada al cilindre hidràulic també es desplaça. El banc de càrregues, que aguanta la força del pistó, no és perfectament rígid. Per tant, aquesta secció es desplaça i és necessari conèixer-ne el valor.

A l'inici de l'assaig experimental, habitualment durant els primers 20kN de càrrega aplicada, el sistema necessita acoblar-se. Aquest fet pot apreciar-se en les gràfiques força-desplaçament, on les corbes presenten una pendent inferior al inici. Aquesta fase es diferencia per tenir problemes d'assentament. Per a poder comparar aquestes gràfiques amb les que s'obtingran de les simulacions numèriques (apartat 6), és necessari eliminar aquesta fase i no representar-la. Alguns dels resultats obtinguts experimentalment, sense eliminar l'acoblament, es troben a les gràfiques següents (Fig. 3.21-3.24). Per a la resta de resultats, consultar l'ANNEX A.

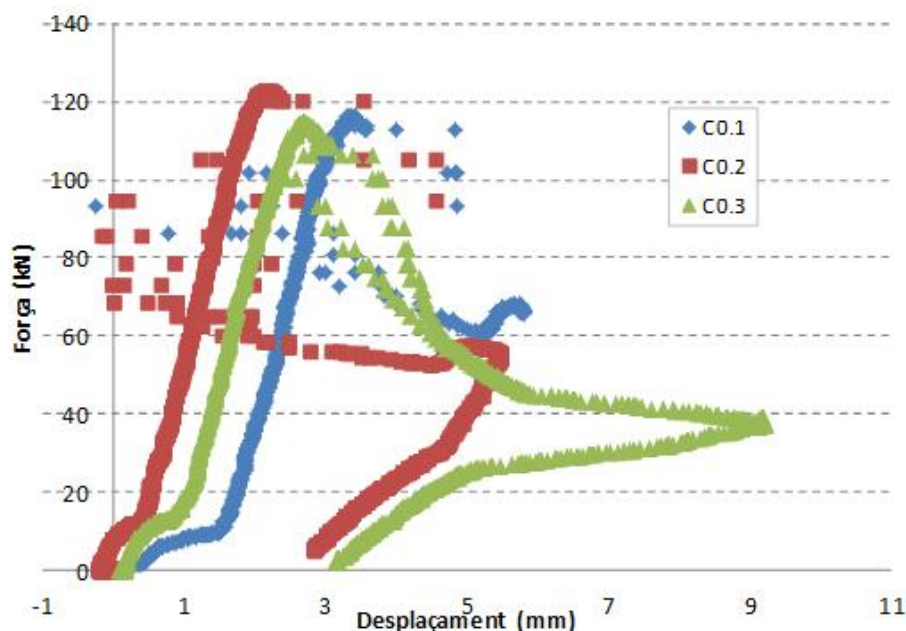


Fig. 3.21 Resultats per als perfils amb perforacions amb 0mm d'excentricitat de la càrrega

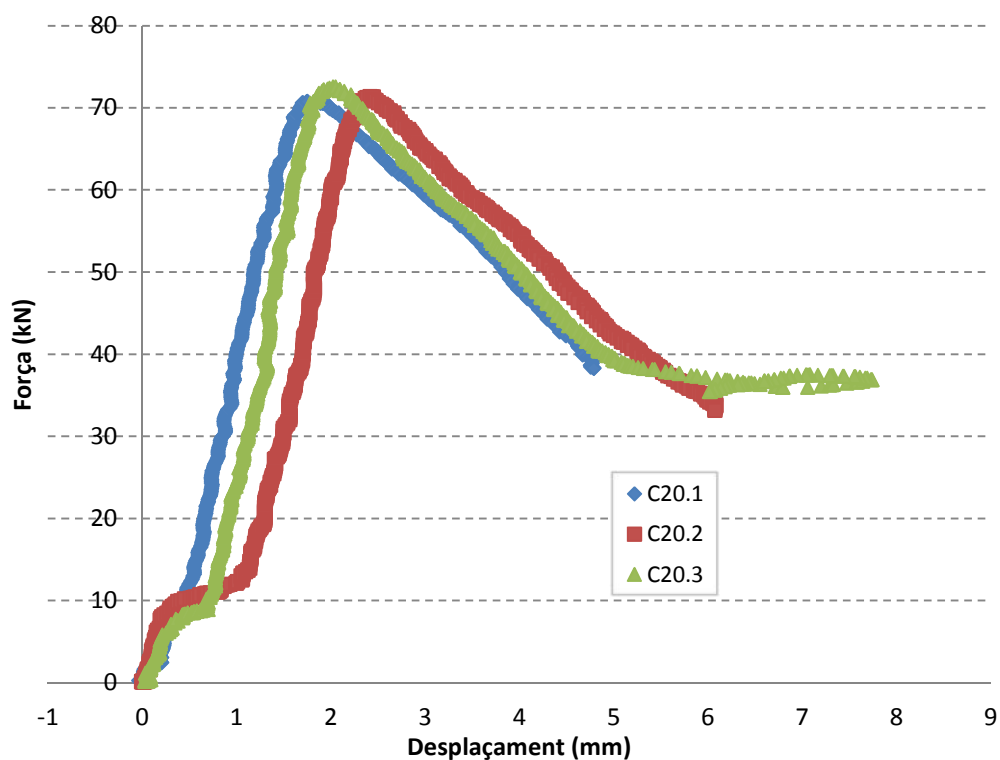


Fig. 3.22 Resultats per als perfils amb perforacions amb 20mm d'excentricitat de la càrrega

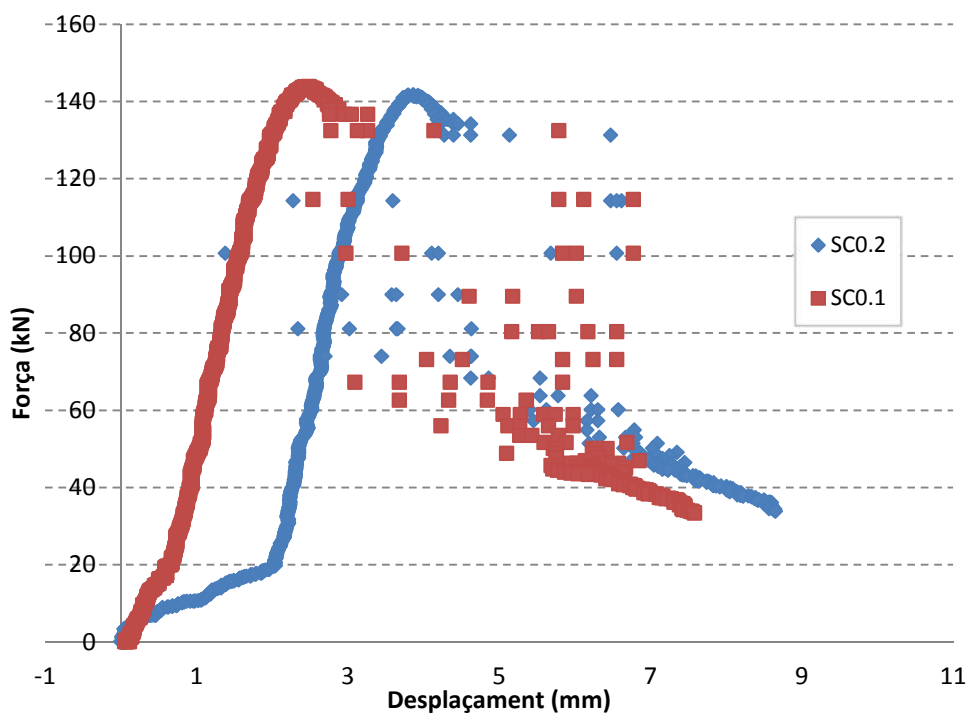


Fig. 3.23 Resultats per als perfils sense perforacions amb 0mm d'excentricitat de la càrrega

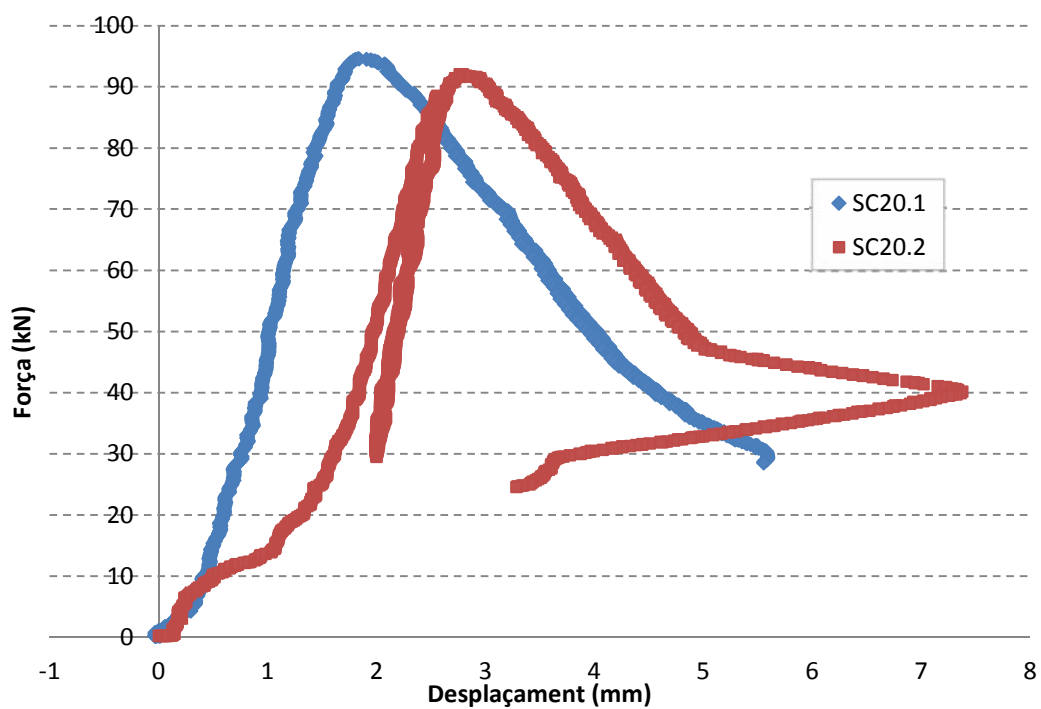


Fig. 3.24 Resultats per als perfils amb perforacions amb 20 mm d'excentricitat de la càrrega

4. Simulacions numèriques

En aquest capítol es calcula, mitjançant el mètode dels elements finits, la càrrega última a flexo-compensió que suporten els perfils tipus *rack* estudiats en aquest treball. Es presenten tres mètodes diferents per obtenir aquest valor. En el primer, es fa servir el concepte d'imperfeció geomètrica per al càlcul. El següent, consisteix en introduir les tensions residuals i enduriment per deformació del perfil causats pel procés de fabricació en el model. L'últim mètode consisteix a no introduir cap dels conceptes utilitzats per als dos càlculs anteriors. Els valors obtinguts mitjançant aquestes metodologies es comparen gràficament al final del capítol.

4.1. Perfil i material d'estudi

El perfil analitzat és el mateix perfil utilitzat en els assajos experimentals, amb o sense perforacions. Les seves dimensions bàsiques es mostren a la Fig. 4.1. El gruix utilitzat és de 1,8 mm.

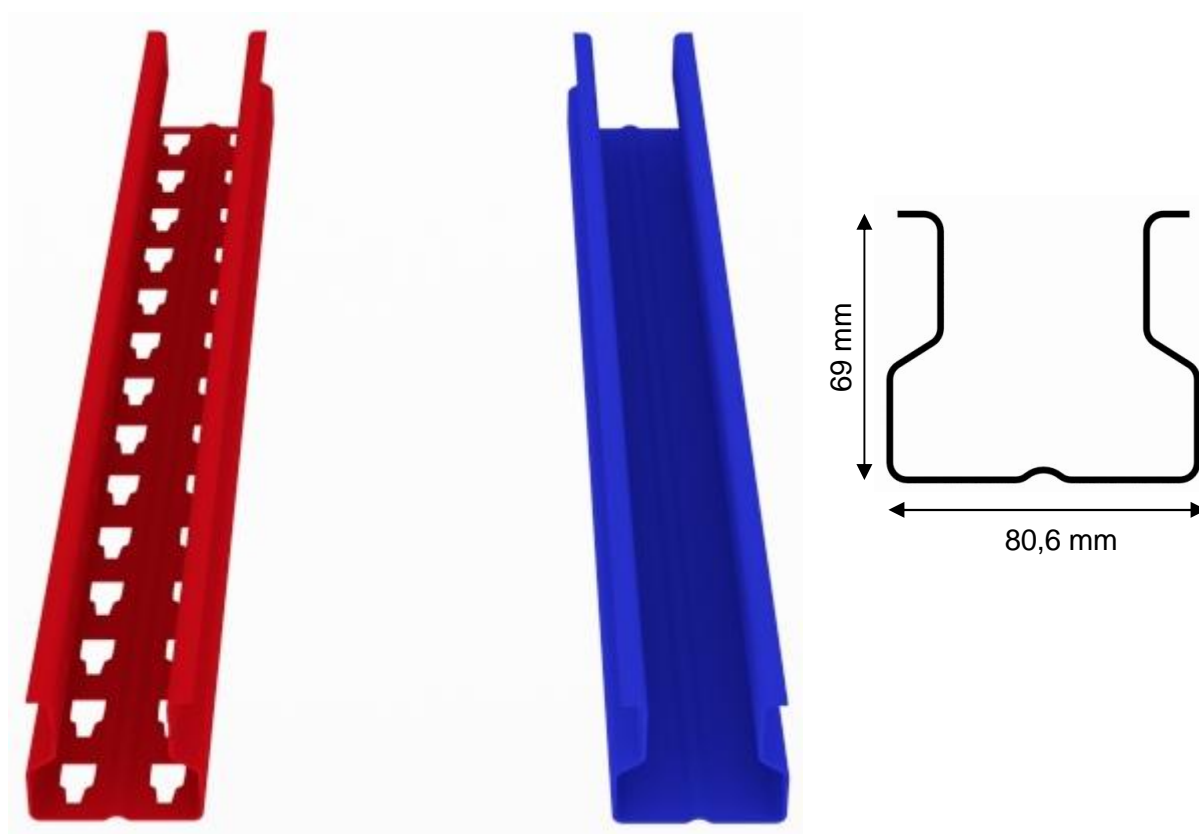


Fig. 4.1 Perfiles d'estudi per a les simulacions numèriques

El material d'estudi és exactament el mateix que en el capítol anterior, amb un valor de 423 MPa.

4.2. Càlcul de la càrrega última mitjançant imperfecció geomètrica

Aquest mètode utilitza una imperfecció geomètrica per al càlcul de la càrrega de fallida del puntal. El càlcul lineal inicial permet escollir quin mode de vinclament s'utilitzarà per a obtenir el valor de la imperfecció geomètrica corresponent. Com s'ha comentat a l'apartat 2, el mode DS tancat suporta una càrrega menor que el DS obert, i per aquesta raó és el mode que s'ha d'estudiar per a obtenir finalment la càrrega de fallida del puntal. Malgrat això, és important considerar el tipus de fallida obtingut en els assajos experimentals per a decidir quin mode és el més adient per a simular. Aquest fet és causa de que els assajos experimentals han deixat dos tipus de fallida distorsional diferent, explicat en l'apartat 3.

Per a definir un valor d'imperfecció geomètrica no hi ha un criteri únic. Per aquest treball, s'ha decidit escollir unes equacions analítiques senzilles, que consisteixen en dividir un paràmetre geomètric de la secció per un cert nombre per a obtenir-ne un valor (Taula 4.1). El valor que divideix depèn del tipus de vinclament que presenta el perfil. En el cas d'aquest treball, amb una L de 700 mm, es té una fallida distorsional del puntal enfront a esforços de flexo-compensió. En aquest cas, el valor de la imperfecció és igual a 1,38 mm.

En la tesi doctoral de Bonada [6], s'exposen els resultats d'imperfecció geomètrica obtinguda a partir de càlculs numèrics mitjançant combinacions dels diferents modes de vinclament.

Mode de fallida	Magnitud de la imperfecció
Local	Ànima/200 (EC 3 part 1-5)
Distorsional	Ala/50 (EC 3 part 1-5)
Global	Longitud/1000 (ECCS)

Taula 4.1 Magnitud de la imperfecció pels diferents modes de vinclament. Font: [6]

Per a obtenir la forma de la imperfecció (mode de vinclament) existeixen diferents mètodes disponibles. En aquest cas s'ha utilitzat el mètode Subspace.

Finalment, és necessari un càlcul no lineal per a obtenir la càrrega última de fallida del puntal. Aquest parteix d'una geometria inicial que coincideix amb la forma d'imperfecció escollida en el càlcul lineal.

Per a obtenir la càrrega final s'han utilitzat dos algorismes de resolució diferents en funció de l'objectiu. Primerament, s'ha utilitzat el mètode de Riks o arc-length, ja que permet obtenir la càrrega última de manera més ràpida que el mètode incremental i iteratiu de Newton-Raphson. Aquest segon mètode, permet obtenir les corbes força-desplaçament fins a un desplaçament determinat. S'ha dividit el procés de càrrega en 80 passos i, en el segon cas, s'ha fixat, a més a més, un màxim de 300 passos.

El mètode utilitzat es pot resumir amb el següent esquema (Fig. 4.2), ja utilitzat en la tesi doctoral de Bonada [6]:

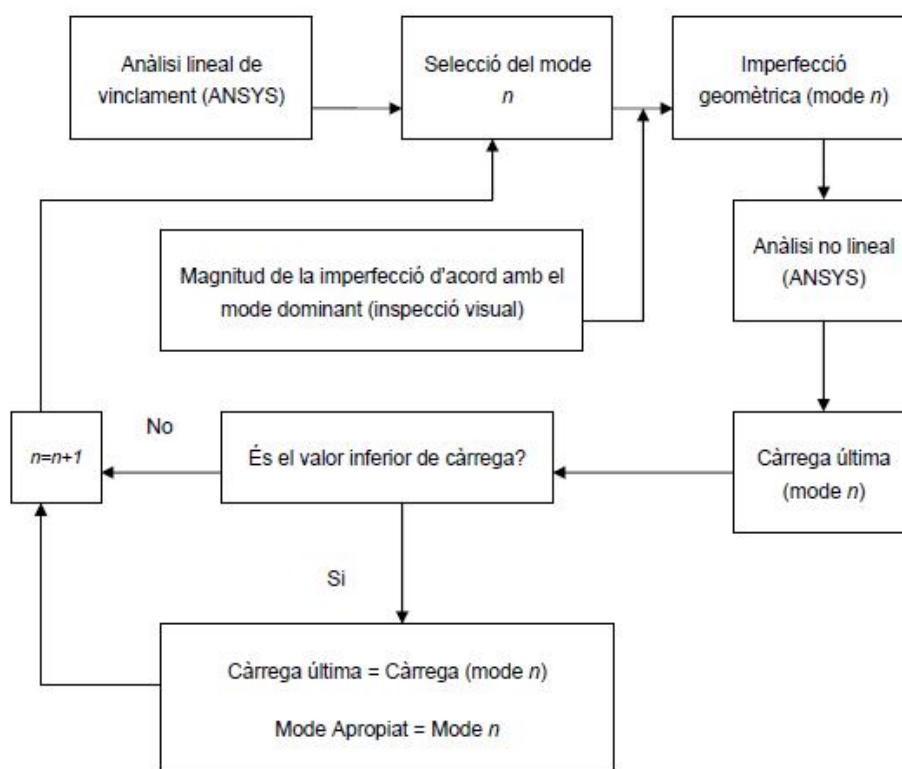


Fig. 4.2 Esquema de càlcul de la metodologia del mode FEM apropiat. Font: [6]

En el cas de no utilitzar imperfecció geomètrica, només és necessari realitzar un càlcul no lineal, sense haver d'importar la geometria de cap càlcul lineal previ.

4.2.1. Definició del model i condicions de contorn

L'ANSYS 13.0 [7], és el programa utilitzat per a realitzar aquests càlculs numèrics utilitzant imperfecció geomètrica. El model consta de dues parts clarament diferenciades: el puntal de 700 mm de longitud i dues plaques col·locades a cada un dels extrems, amb un gruix de 45 mm, per tal d'intentar representar al màxim les condicions dels assajos experimentals. S'han utilitzat l'element *Shell 181* per al puntal (6 graus de llibertat per cada un dels 4 nodes) i l'element *Solid 45* per a cada una de les plaques dels extrems (3 graus de llibertat per cada un dels 8 nodes).

Tal com s'ha explicat en l'apartat 3, existeixen tres condicions de contorn: l'articulació de la flexió i l'encastament de la torsió. A més a més, les dues seccions extremes del puntal han de romandre invariables, sense distorsió. Aquestes condicions es mostren a les figures 4.3 i 4.4 .

En primer lloc, es connecten diversos punts dels extrems del puntal amb punts de les plaques que els subjecten, per tal d'acoblar els graus de llibertat entre punts . D'aquesta manera s'aconsegueix evitar la distorsió de les seccions extremes. Per a les dues altres condicions, es restringeixen en ambdues plaques el moviment transversal de dos punts de la placa. Així, es restringeix la torsió del puntal i es permet que la flexió sigui articulada. Per acabar de simular les condicions de l'assaig experimental, es restringeixen els 3 graus de llibertat d'una de les plaques, justament el punt sobre l'eix longitudinal de la placa oposada al cilindre hidràulic. En l'altre placa, es restringeixen només dos graus de llibertat, permetent el desplaçament longitudinal.

Per evitar problemes a l'hora d'importar la geometria del càlcul lineal al càlcul no lineal, es creen dos punts en el model, tals que aquests són el punt on s'aplica la càrrega considerant l'excentricitat aplicada i el centre de gravetat efectiu (excentricitat nul·la).

L'anàlisi realitzat és materialment i geomètricament no lineal. El comportament del material es pot observar a la Fig. 4.5.

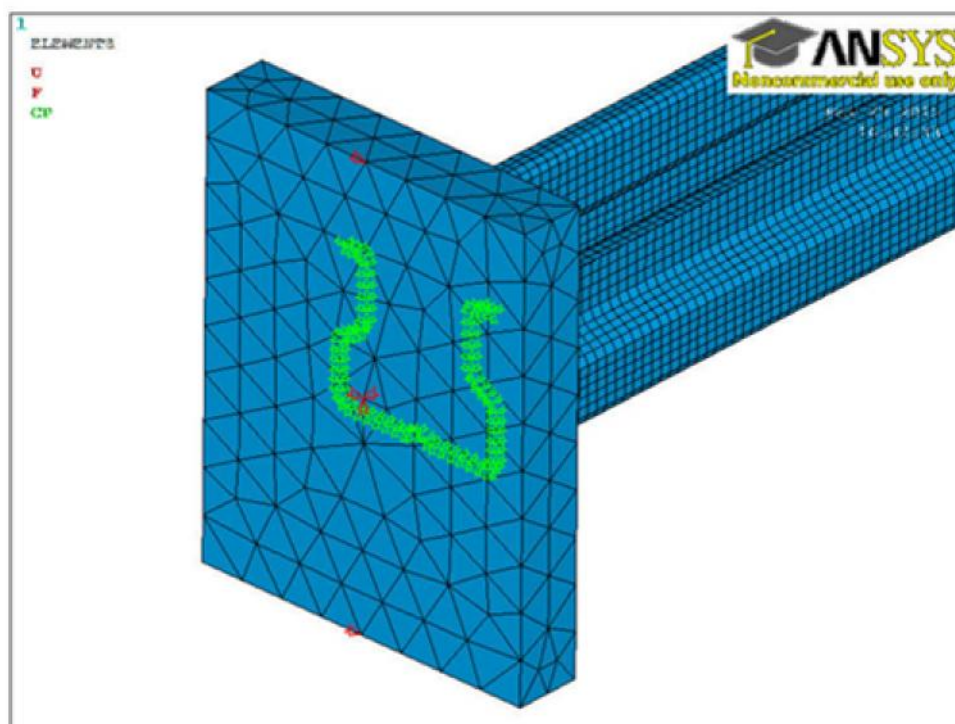


Fig. 4.3 Condicions de contorn per a la placa oposada a on s'aplica la càrrega

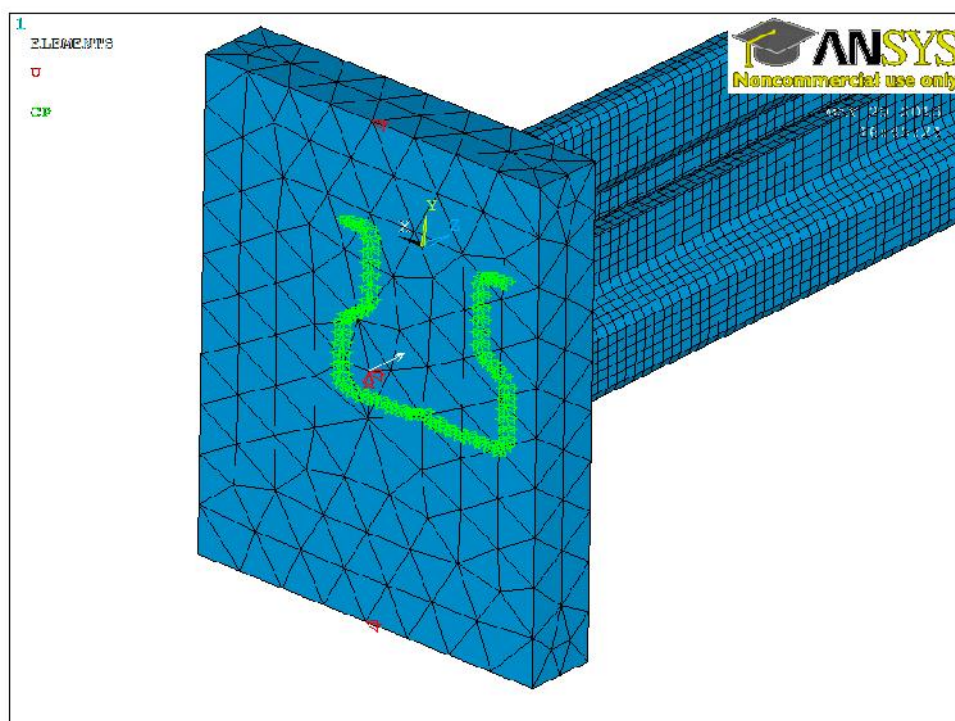


Fig. 4.4 Condicions de contorn per a la placa per on s'aplica la càrrega

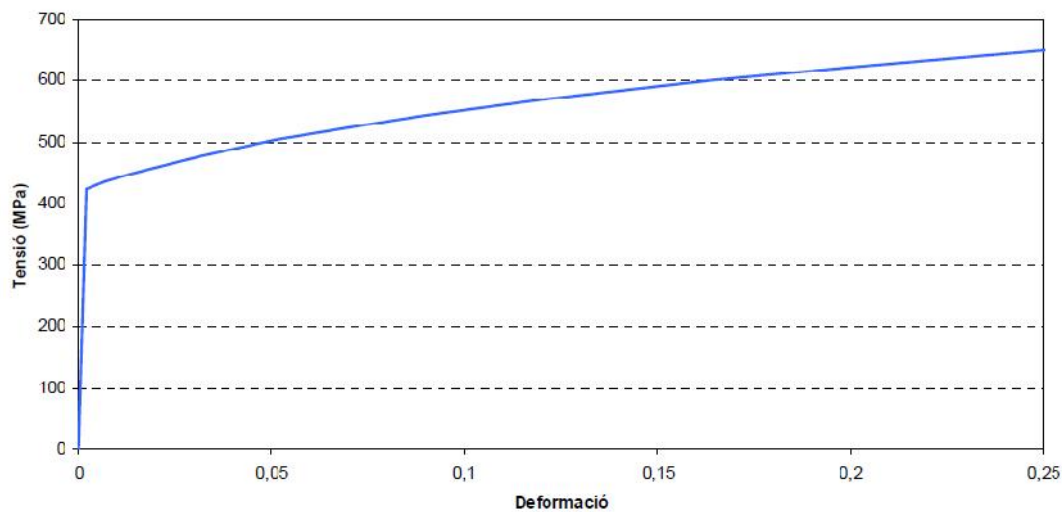


Fig. 4.5 Model material utilitzat en les simulacions numèriques. El comportament plàstic segueix una corba de Swift. Font: [6]

4.3. Resultats numèrics

Els resultats obtinguts mitjançant la metodologia esmentada es presenten en les Taules 4.3 i 4.4, per als perfils amb i sense perforacions respectivament. Aquests es comparen amb els resultats experimentals obtinguts a l'apartat 3. En la Fig. 4.6 i 4.7 es mostra una comparació entre els resultats numèrics i els experimentals, amb els diferents modes de vinclament. En la taula següent es mostren les deformades corresponents als modes DS i DA per a 0 i 20mm d'excentricitat per al perfil amb perforacions (Taula 4.2):

Excentricitat (mm)	DS	DA
0		
20		

Taula 4.2 Deformades per als modes DS i DA obtingudes per al perfil amb perforacions mitjançant la introducció d'imperfeció geomètrica

Excentricitat (mm)	Càrrega última (kN)	Mitjana EXP (kN)	IMP/EXP	Mode de fallida/ Mode FEM utilitzat
0	115,28	117,59	0,98	DS (tancat) / I
5	103,83	102,26	1,02	DS(tancat) / I
10	89,36	89,43	1,00	DS (tancat) / I
15	79,11	76,74	1,03	DS (tancat) / I
20	70,56	71,67	0,98	DS (tancat) / I
		Mitjana	1,00	
		Desviació	0,02	
0	122,66	117,59	1,04	DA / II
5	103,37	102,26	1,01	DA / II
10	89,28	89,43	1,00	DA / II
15	78,43	76,74	1,02	DA / II
20	70,40	71,67	0,98	DA / II
		Mitjana	1,01	
		Desviació	0,02	
0	138,10	117,59	1,17	Sense imperfecció
5	113,70	102,26	1,11	Sense imperfecció
10	96,83	89,43	1,08	Sense imperfecció
15	85,01	76,74	1,11	Sense imperfecció
20	75,51	71,67	1,05	Sense imperfecció
		Mitjana	1,10	
		Desviació	0,04	

Taula 4.3 Resultats numèrics obtinguts per al perfil amb perforacions per a diferents modes de vinclament (DS i DA) i sense imperfecció geomètrica

Excentricitat (mm)	Càrrega última (kN)	Mitjana EXP (kN)	IMP/EXP	Mode de fallida/ Mode FEM utilitzat
0	151,11	142,8	1,06	DA / I
5	141,38	131,98	1,07	DA / I
10	124,67	119,98	1,04	DA / I
15	110,53	105,89	1,04	DA / I
20	97,76	93,34	1,05	DA / I
		Mitjana	1,05	
		Desviació	0,01	
0	139,10	142,8	0,97	DS (tancat) / II
5	125,62	131,98	0,95	DS (tancat) / II
10	107,84	119,98	0,90	DS (tancat) / II
15	94,52	105,89	0,89	DS (tancat) / II
20	84,13	93,34	0,90	DS (tancat) / II
		Mitjana	0,92	
		Desviació	0,04	
0	154,86	142,8	1,08	DS (obert) / II
5	139,12	131,98	1,05	DS (obert) / II
10	122,57	119,98	1,02	DS (obert) / II
15	109,26	105,89	1,03	DS (obert) / II
20	96,96	93,34	1,04	DS (obert) / II
		Mitjana	1,04	
		Desviació	0,02	
0	165,80	142,8	1,16	Sense imperfecció
5	137,71	131,98	1,04	Sense imperfecció
10	116,54	119,98	0,97	Sense imperfecció
15	97,76	105,89	0,92	Sense imperfecció
20	89,22	93,34	0,96	Sense imperfecció
		Mitjana	1,01	
		Desviació	0,09	

Taula 4.4 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions per a diferents modes de vinclament (DS (obert), DS (tancat) i DA) i sense imperfecció geomètrica

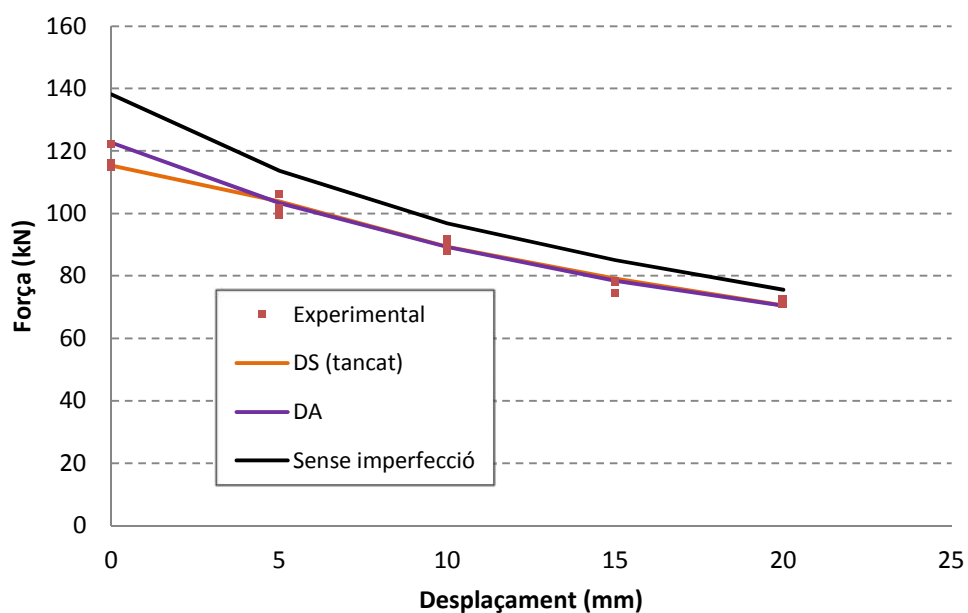


Fig. 4.6 Comparació dels resultats numèrics amb els resultats experimentals per al perfil amb perforacions

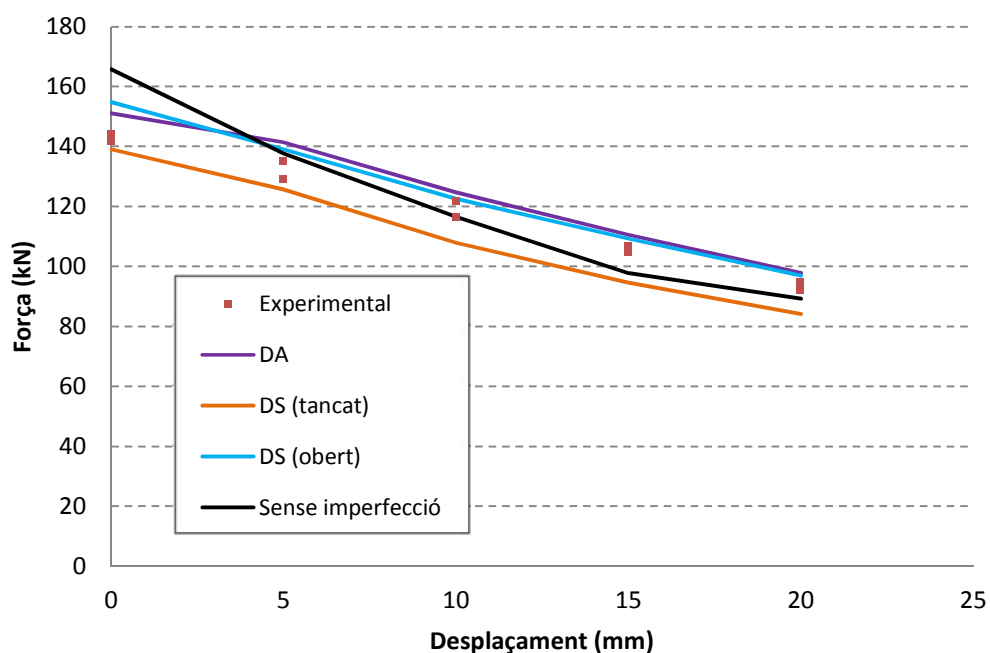


Fig. 4.7 Comparació dels resultats numèrics amb els resultats experimentals per al perfil sense perforacions

Es pot observar que el mode DS tancat presenta una càrrega última menor en tots els casos anteriors, com ja s'havia comentat anteriorment.

Pel que fa referència al perfil amb perforacions, els resultats obtinguts mitjançant el mode de vinclament DS tancat, són molts semblants als resultats obtinguts durant el assajos experimentals. En canvi, per al perfil sense forats existeix una diferència més significativa entre els resultats numèrics i els experimentals, si es compara el mode de fallida produït en els assajos (DS obert). Per tant, en l'apartat següent es proposen variacions respecte la geometria original per tal d'intentar apropar els resultats numèrics als analítics. Per ara, la diferència entre ells és d'un 5% aproximadament.

4.4. Càlculs addicionals del perfil sense perforacions

S'ha analitzat el perfil sense perforacions i s'ha pogut observar que aquest no és exactament igual que el perfil teòric introduït a la Fig. 4.1. Aquest perfil presenta una obertura major, equivalent a uns 3 mm per cada costat. A més a més, s'ha mesurat el gruix del puntal i resulta, que aquest és lleugerament superior, sobretot a les parts de l'ala. Els gruixos mesurats es mostren a la Fig. 4.8. En la Fig. 4.9 es mostra una imatge del perfil sense perforacions i del perfil amb perforacions, on es pot observar la primera diferència esmentada. Per últim, s'ha pogut observar que el perfil no és totalment simètric. Aquest fet posa de manifest que és possible que els perfils assajats experimentalment no siguin uniformes al llarg de la seva longitud.

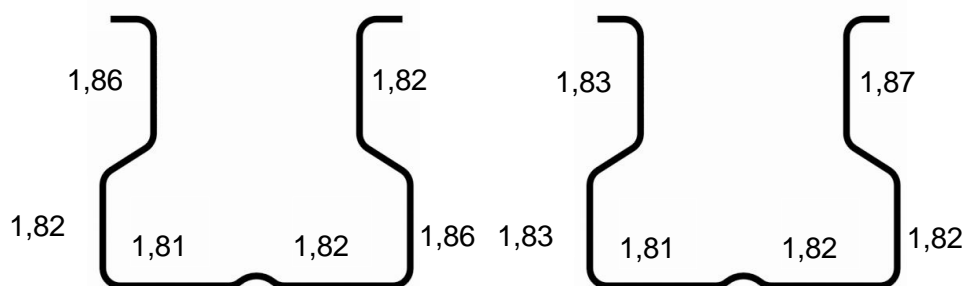


Fig. 4.8 Gruixos mesurats en el perfil sense perforacions en cada un dels dos extrems, en mm



Fig. 4.9 Perfil amb i sense perforacions, respectivament.

Es proposen diversos mètodes a seguir, que es basen en canviar la geometria generada per a realitzar els càlculs amb ANSYS 13.0 . Els càlculs proposats es realitzen en el següents subapartats.

4.4.1. Extrem de l'ala més llarga

En aquest primer intent, s'intenta modificar la secció original el mínim possible. Per tant, s'allarguen els llavis de l'ala 3 mm per cada costat. La resta de la secció roman exactament igual que la secció original. Aquesta secció modificada es pot observar a la Fig. 4.10 . Els resultats obtinguts es mostren a la Taula 4.4, per a modes de vinclament DS obert i DS tancat .

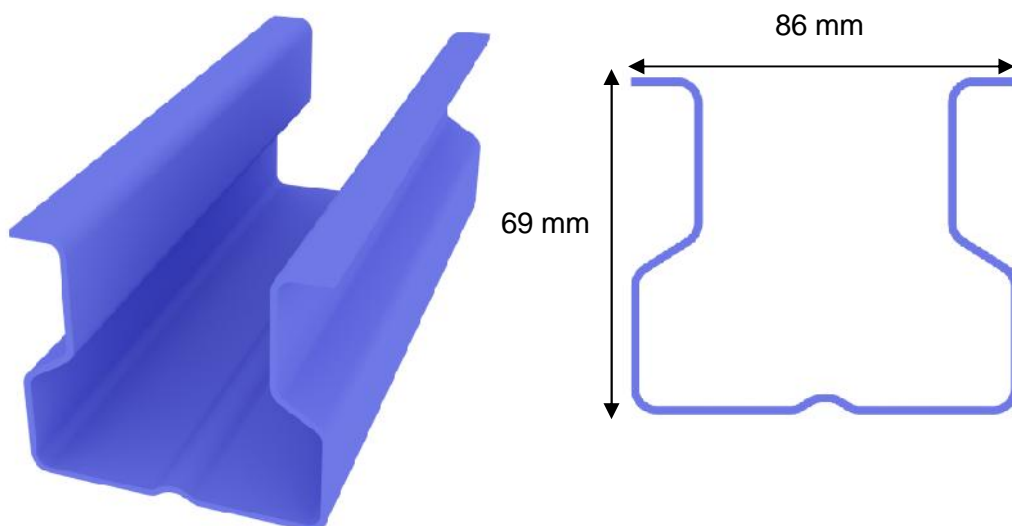


Fig. 4.10 Perfil sense perforacions, ala més llarga

Excentricitat (mm)	Càrrega última (kN)	Mitjana EXP (kN)	IMP/EXP	Mode de fallida/ Mode FEM utilitzat
0	159,48	142,8	1,12	DS (tancat) / VI
5	135,95	131,98	1,03	DS (tancat) / VI
10	115,22	119,98	0,96	DS (tancat) / VI
15	100,51	105,89	0,95	DS (tancat) / VI
20	89,10	93,34	0,95	DS (tancat) / VI
Mitjana			1,00	
Desviació			0,07	
0	169,03	142,8	1,18	DS (obert) / VI
5	149,99	131,98	1,14	DS (obert) / VI
10	130,56	119,98	1,09	DS (obert) / VI
15	114,84	105,89	1,08	DS (obert) / VI
20	101,76	93,34	1,09	DS (obert) / VI
Mitjana			1,12	
Desviació			0,04	

Taula 4.5 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions (ala més llarga) per als modes DS obert i tancat.

4.4.2. Ala inclinada

La segona secció proposada es basa en inclinar l'ala del perfil amb la mateixa obertura que el perfil anterior, però amb l'extrem de l'ala amb la mateixa llargada que el perfil original. Aquesta segona secció es pot observar a la Fig. 4.11 . Els resultats obtinguts es mostren a la Taula 4.6, per als modes DS obert i tancat.

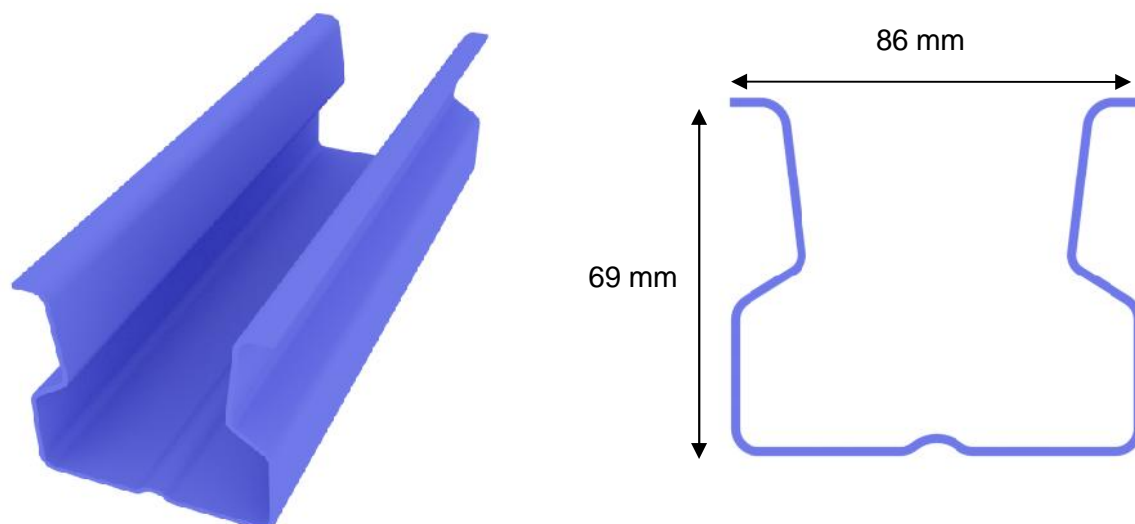


Fig. 4.11 Perfil sense perforacions, ala inclinada

Excentricitat (mm)	Càrrega última (kN)	Mitjana EXP (kN)	IMP/EXP	Mode de fallida/ Mode FEM utilitzat
0	144,53	142,8	1,01	DS (tancat) / II
5	128,67	131,98	0,97	DS (tancat) / II
10	110,24	119,98	0,92	DS (tancat) / II
15	96,80	105,89	0,91	DS (tancat) / II
20	86,04	93,34	0,92	DS (tancat) / II
Mitjana			0,95	
Desviació			0,04	
0	156,37	142,8	1,10	DS (obert) / II
5	140,40	131,98	1,06	DS (obert) / II
10	123,96	119,98	1,03	DS (obert) / II
15	110,79	105,89	1,05	DS (obert) / II
20	98,54	93,34	1,06	DS (obert) / II
Mitjana			1,06	
Desviació			0,03	

Taula 4.6 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions (ala inclinada) per als modes DS obert i tancat.

4.4.3. Secció real

L'última secció proposada consisteix en fer una aproximació del perfil real. S'ha dibuixat la meitat de la secció d'un extrem d'aquest puntal i se n'ha fet la simetria per obtenir el perfil desitjat. La raó és, perquè encara que el perfil no sigui simètric, no es coneix el costat del perfil cap al qual es va aplicar l'excentricitat.

Aquest perfil s'ha obtingut aproximant el perfil real mitjançant corbes i arcs de circumferència, amb la màxima precisió possible (Fig. 4.12). Els resultats obtinguts es mostren a la taula 4.7 .

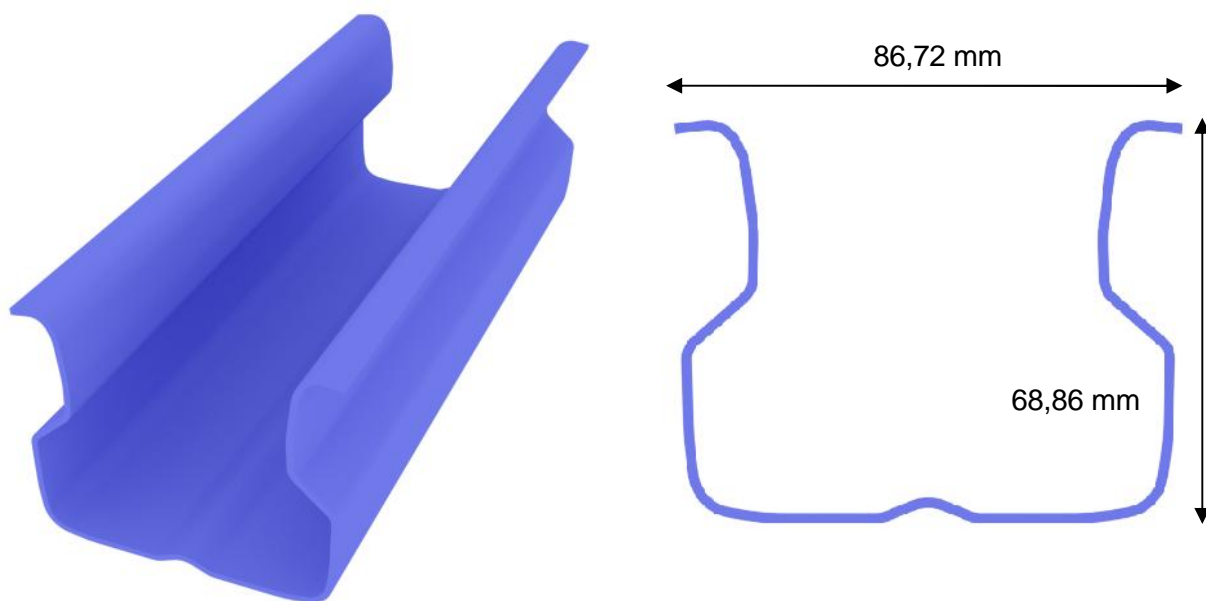


Fig. 4.12 Perfil sense perforacions, geometria real

A més a més, s'ha realitzat una aproximació més senzilla de la secció utilitzant únicament rectes. Els resultats obtinguts són pràcticament iguals per a les dues seccions. Per a consultar la segona secció i els seus resultats, consultar l'ANNEX C.

Excentricitat (mm)	Càrrega última (kN)	Mitjana EXP (kN)	IMP/EXP	Mode de fallida/ Mode FEM utilitzat
0	142,37	142,8	1,00	DS (tancat) / I
5	127,91	131,98	0,97	DS (tancat) / I
10	110,15	119,98	0,92	DS (tancat) / I
15	96,88	105,89	0,92	DS (tancat) / I
20	86,62	93,34	0,93	DS (tancat) / I
Mitjana			0,95	
Desviació			0,04	
0	154,12	142,8	1,08	DS (obert) / I
5	138,36	131,98	1,05	DS (obert) / I
10	122,18	119,98	1,02	DS (obert) / I
15	109,32	105,89	1,03	DS (obert) / I
20	98,02	93,34	1,05	DS (obert) / I
Mitjana			1,04	
Desviació			0,02	

Taula 4.7 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions (segona aproximació del perfil real) per als modes DS obert i tancat

4.5. Tensions residuals

Un altre mètode per a calcular la càrrega última d'aquest tipus de perfil, consisteix a introduir les tensions residuals i l'enduriment per deformació provinents del procés de fabricació en el model d'ANSYS. Es pot recórrer a dos mètodes per a obtenir aquests valors. Com s'ha comentat anteriorment, és possible realitzar una simulació del procés de conformat mitjançant un programa especialitzat anomenat COPRA. D'altra banda, també es pot recórrer a realitzar una sèrie de mesures experimentals sobre els puntals ja fabricats mitjançant galgues extensiomètriques. Tota aquesta informació és disponible a la Tesi Doctoral de Bonada [6].

Per a realitzar els càlculs, es fan servir els valors obtinguts mitjançant el programa COPRA. És necessari utilitzar un procés per traslladar aquests valors als models d'ANSYS, que seran els utilitzats per a realitzar els càlculs posteriors. A [6], s'explica detalladament el procediment utilitzat.

A grans trets, el procediment consisteix en definir una coordenada s que recorre el perfil des d'un extrem fins al eix de simetria de la secció. Es fa coincidir, per ambdós models, el mateix valor de s a l'inici i al final del recorregut. Aquesta coordenada s , permet relacionar els punts del model d'ANSYS amb el de COPRA, ja que, per qüestions de programa, la secció utilitzada en el segon no pot contenir tants punts com en el primer. Per tant, aquesta ha de ser simplificada i ja no és exactament la mateixa per als dos models. D'aquesta manera, es van introduint els valors de tensions residuals i enduriment per deformació, punt a punt.

4.5.1. Patró de tensions residuals

Un cop s'ha realitzat el procés de trasllat d'un programa a l'altre, el model d'ANSYS incorpora el patró de tensions residuals desitjat, que és el que s'utilitzarà per a realitzar les simulacions. Aquest, es pot observar a les següents figures (Fig. 4.13-4.15), per al perfil sense perforacions.

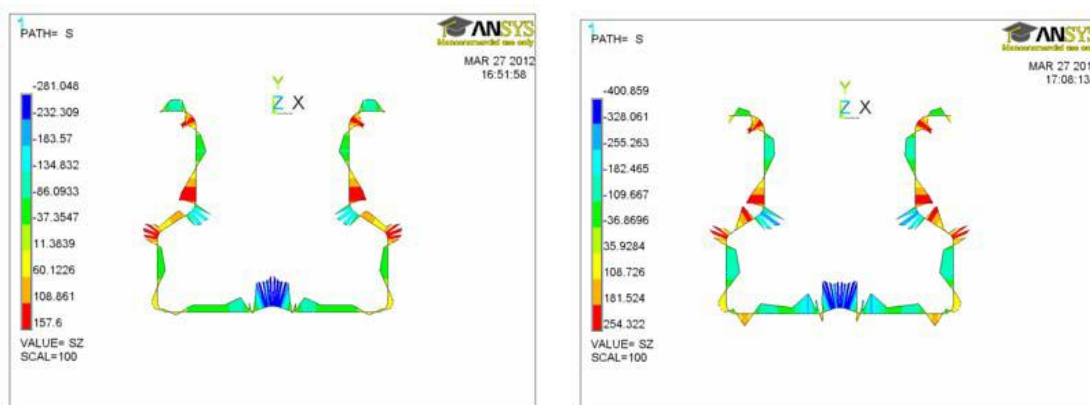


Fig. 4.13 Tensions residuals longitudinals en la cara anterior. (Esquerra) Valors en els punts d'integració. (Dreta) Valors extrapolats. Font: [6]

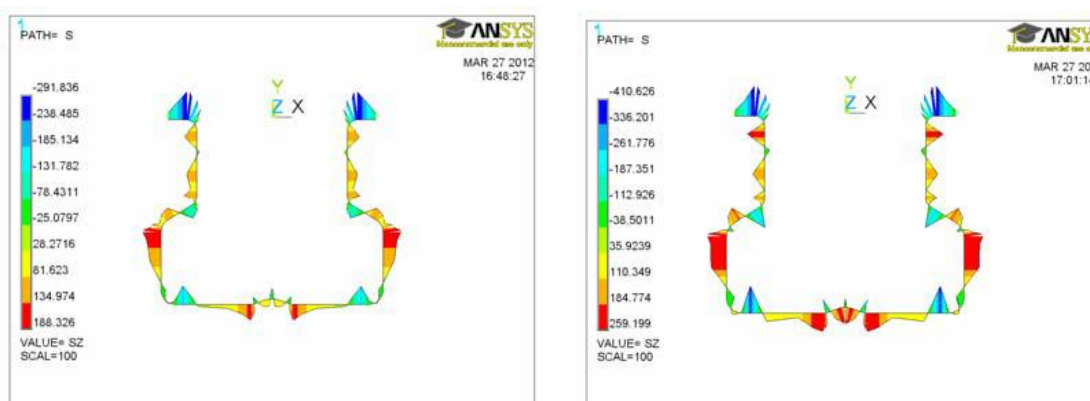


Fig. 4.14 Tensions residuals longitudinals en la cara exterior. (Esquerra) Valors en els punts d'integració. (Dreta) Valors extrapolats. Font: [6]

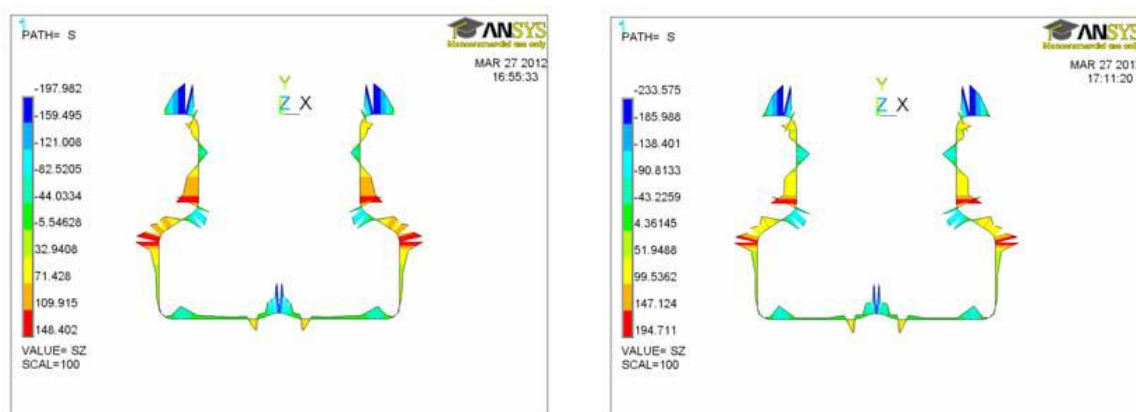


Fig. 4.15 Tensions residuals longitudinals de membrana. (Esquerra) Valors en els punts d'integració. (Dreta) Valors extrapolats. Font: [6]

Per al perfil amb perforacions, és necessari la utilització d'una altra metodologia. A [6], es van fer servir la metodologia multi-patró i la del patró virtual. La primera es basa en definir diverses zones del perfil i, per a cada una d'elles, es defineix un patró de tensions residuals. En la segona, es crea una secció fictícia del perfil que no conté forats. Els resultats es recullen en diverses gràfiques. Tant les diferents zones de la primera metodologia com les dues seccions fictícies definides en la segona, es mostren en les figures 4.16 i 4.17-4.18 respectivament.

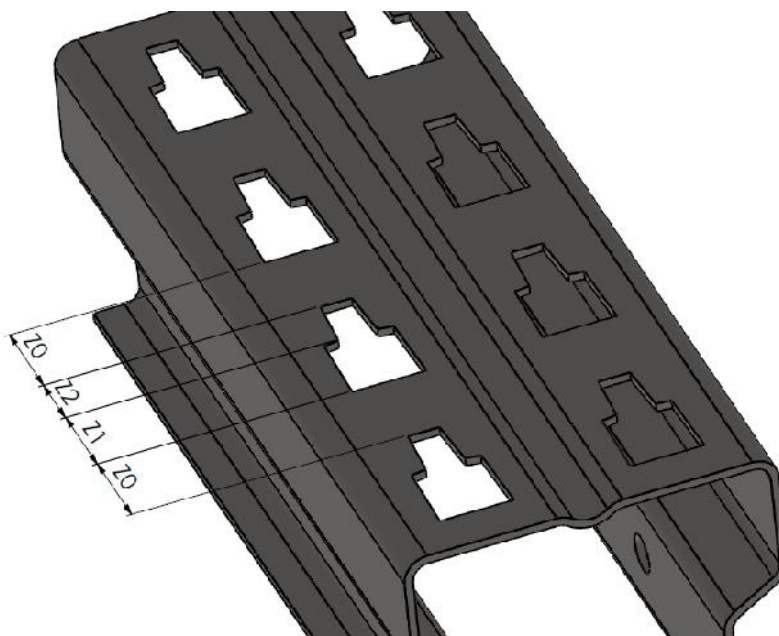


Fig. 4.16 Zones diferents al llarg del mòdul (pitch) del puntal amb perforacions. Font: [6]

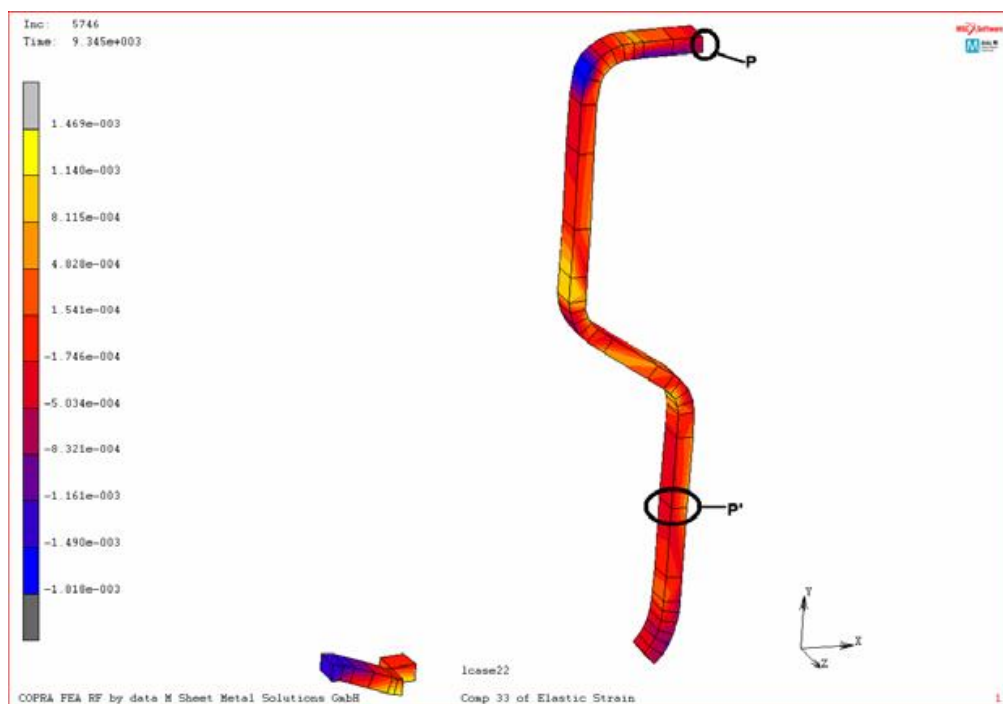


Fig. 4.17 Primera secció utilitzada per a definir el patró virtual, del node P al P'. Font: [6]

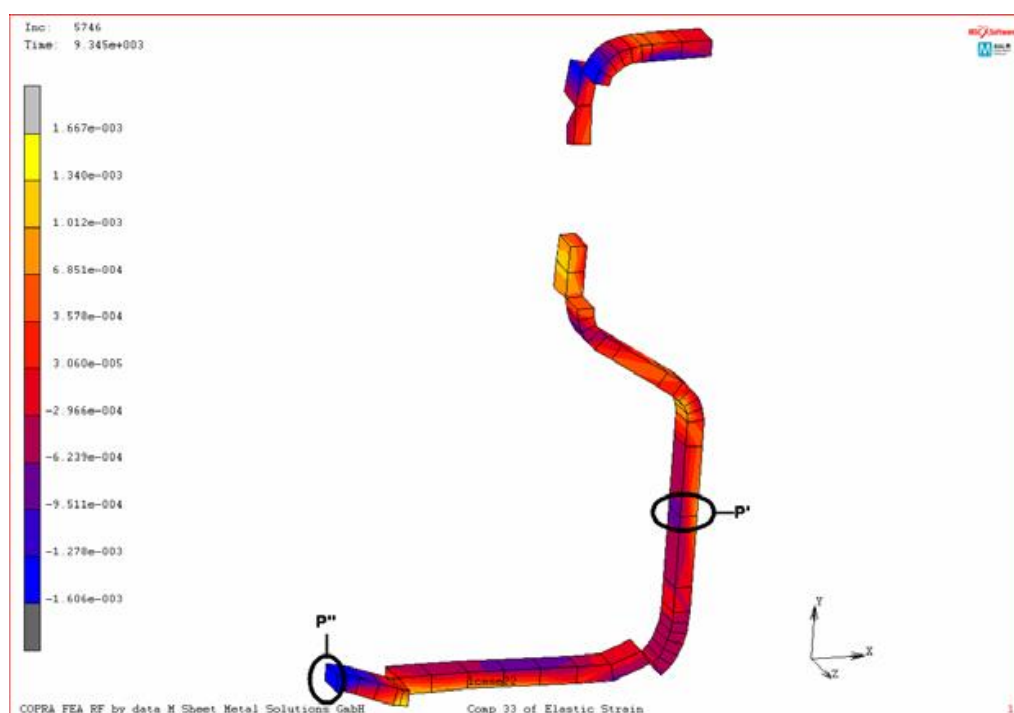


Fig. 4.18 Segona secció utilitzada per definir el patró virtual, del node P' al P''. Font: [6]

4.5.2. Introducció de l'enduriment per deformació

En primer lloc, existeixen dues zones clarament diferenciables pel que respecta a l'enduriment per deformació: les zones planes i les dels radis d'acord. El comportament material utilitzat per a cada una de les zones esmentades es mostra en la figura següent (Fig. 4.19):

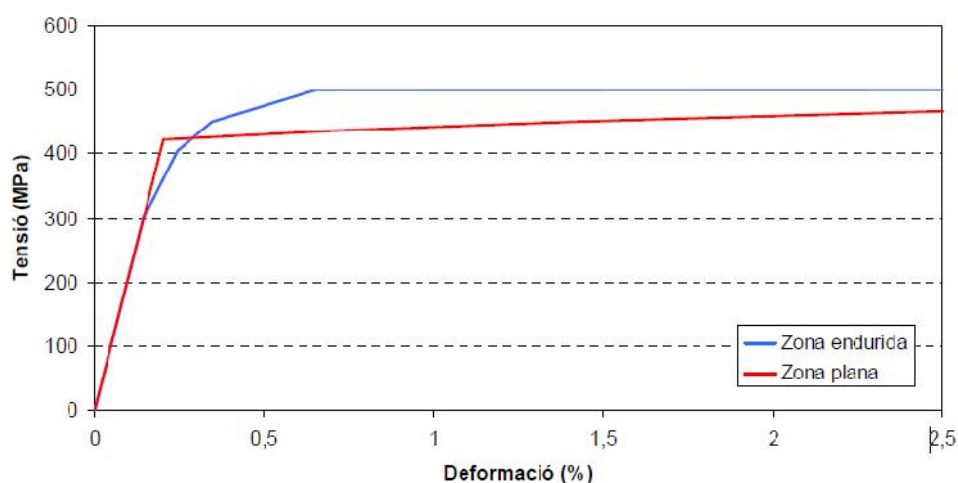


Fig. 4.19 Comparativa entre el comportament material de les zones endureixades respecte a les zones planes utilitzada en la simulació per elements finits. Font: [6]

Per als dos perfils, s'assumeix que l'enduriment per deformació és el mateix en totes les zones dels radis d'acord. En aquest treball, no s'ha considerat la reducció del gruix en aquestes zones, encara que realment existeix aquesta variació.

4.5.3. Definició del model i condicions de contorn

En aquest càlcul, s'han utilitzat el mateix model i condicions de contorn que en el càlcul mitjançant imperfecció geomètrica. En aquest càlcul s'utilitzava un element placa, no adient per a la introducció de les tensions residuals. Aquest element parteix de la hipòtesi que la tensió perpendicular al pla de la làmina és nul·la, cosa que no és així. Per tant, en aquest apartat, s'utilitza un element sòlid (*Solid 186* amb integració reduïda) per a poder introduir aquestes tensions de manera apropiada (Fig. 4.20). Aquest element sòlid consta de 20 nodes.

Amb la introducció de les tensions residuals i l'enduriment per deformació, ja no és necessari introduir una imperfecció geomètrica obtinguda a partir d'un càlcul lineal. Les tensions residuals importades a l'ANSYS han estat extrapolades d'un model de COPRA

amb una malla diferent. Per tant, és necessari reequilibrar el model d'elements finits d'ANSYS abans de la simulació. Els mètodes utilitzats per a aquest reequilibri, diferents entre el perfil amb i sense perforacions, es poden consultar a [6]. Aquest procés genera una imperfecció geomètrica en el puntal, estalviant la realització d'un càlcul lineal per a escollir-ne la forma. Les tensions/deformacions introduïdes són simètriques i, com a conseqüència, la fallida produïda serà també simètrica. Per tant, aquest procediment serà vàlid, ja que en el vinclament distorsional predomina aquest tipus de col·lapse.

Les seccions utilitzades per al perfil amb i sense forats són diferents. Per al primer s'utilitza la secció original i per al segon la secció aproximada calculada al apartat 4.4.3 .

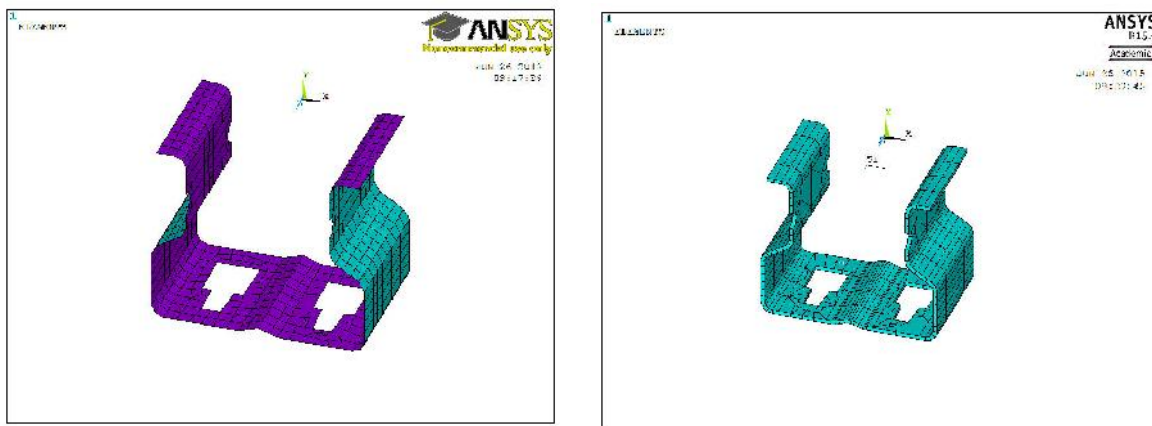


Fig. 4.20 Comparació entre l'element placa utilitzat en el càlcul amb imperfecció geomètrica (esquerra) i l'element sòlid utilitzat en el càlcul amb tensions residuals (dreta).

4.5.4. Resultats numèrics

Els resultats numèrics obtinguts mitjançant aquest mètode es troben a les taules 4.8 i 4.9 . El mode de fallida produït en aquests càlculs és el DS tancat. A mesura que s'augmenta l'excentricitat succeeix l'explicat en l'apartat 1 i, en el col·lapse, una de les ales doblega més que l'altre (Fig. 4.21).

Excentricitat (mm)	Càrrega última (kN)	Mitjana EXP (kN)	TR/EXP	Mode de fallida
0	117,46	117,59	1,00	DS (tancat)
5	101,48	102,26	0,99	DS (tancat)
10	88,13	89,49	0,98	DS (tancat)
15	78,06	76,74	1,02	DS (tancat)
20	70,08	71,67	0,98	DS (tancat)
Mitjana			0,99	
Desviació			0,02	

Taula 4.8 Resultats numèrics obtinguts per al perfil amb perforacions mitjançant el mètode de les tensions residuals

Excentricitat (mm)	Càrrega última (kN)	Mitjana EXP (kN)	TR/EXP	Mode de fallida
0	146,39	142,80	1,03	DS (tancat)
5	129,15	131,98	0,98	DS (tancat)
10	111,78	119,85	0,93	DS (tancat)
15	98,55	105,89	0,93	DS (tancat)
20	88,25	93,34	0,95	DS (tancat)
Mitjana			0,96	
Desviació			0,04	

Taula 4.9 Resultats numèrics obtinguts per al perfil sense perforacions mitjançant el mètode de les tensions residuals

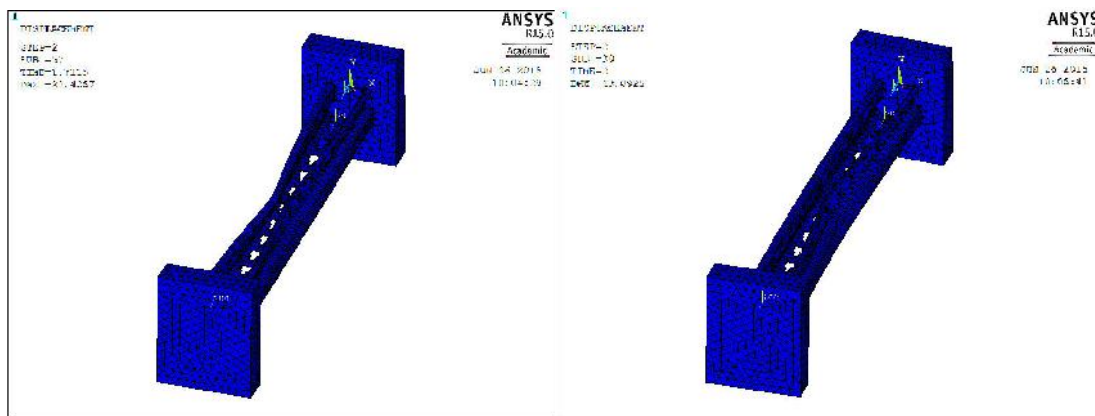


Fig. 4.21 Deformades per a les simulacions amb tensions residuals, amb 0 i 20mm d'excentricitat aplicada

4.6. Gràfiques força-desplaçament de les simulacions numèriques

En les següents figures es mostren les corbes força-desplaçament per als casos de 0 i 20 mm d'excentricitat de càrrega (Fig. 4.22-4.25). Per al perfil amb perforacions, es representen les corbes obtingudes amb el mètode de les tensions residuals, amb imperfecció geomètrica mode DS tancat i sense imperfecció geomètrica. En canvi, per al perfil sense perforacions, del mètode d'imperfecció geomètrica es mostra el mode DS tancat i DS obert.

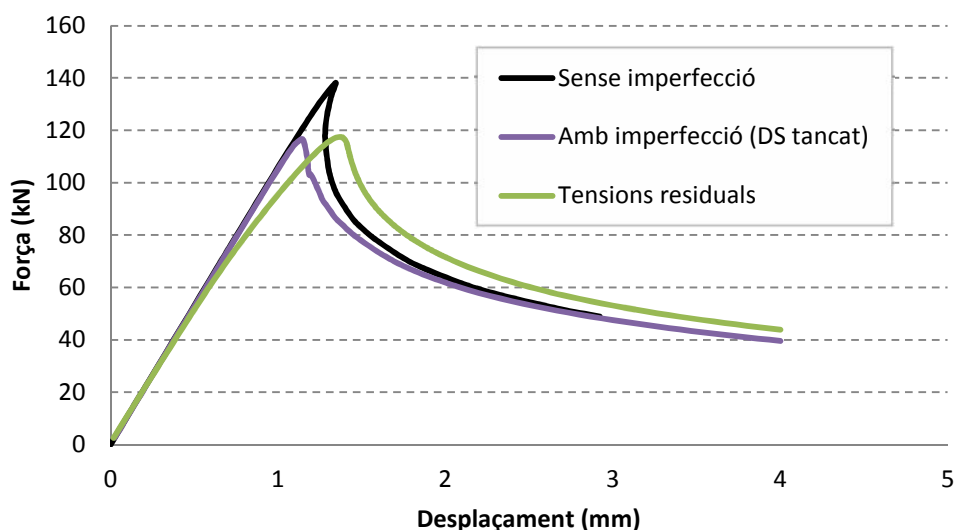


Fig. 4.22 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil amb perforacions amb 0mm d'excentricitat aplicada

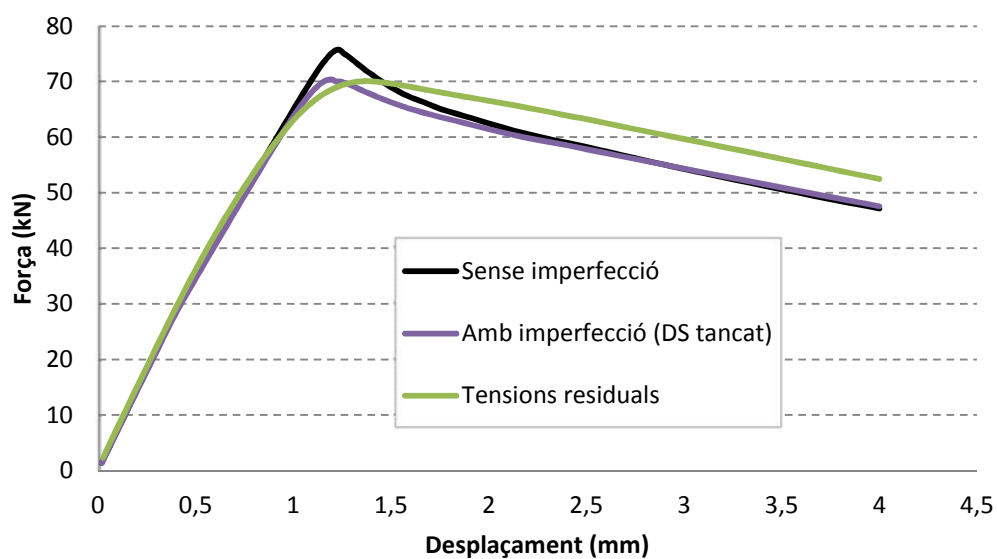


Fig. 4.23 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil amb perforacions amb 20mm d'excentricitat aplicada

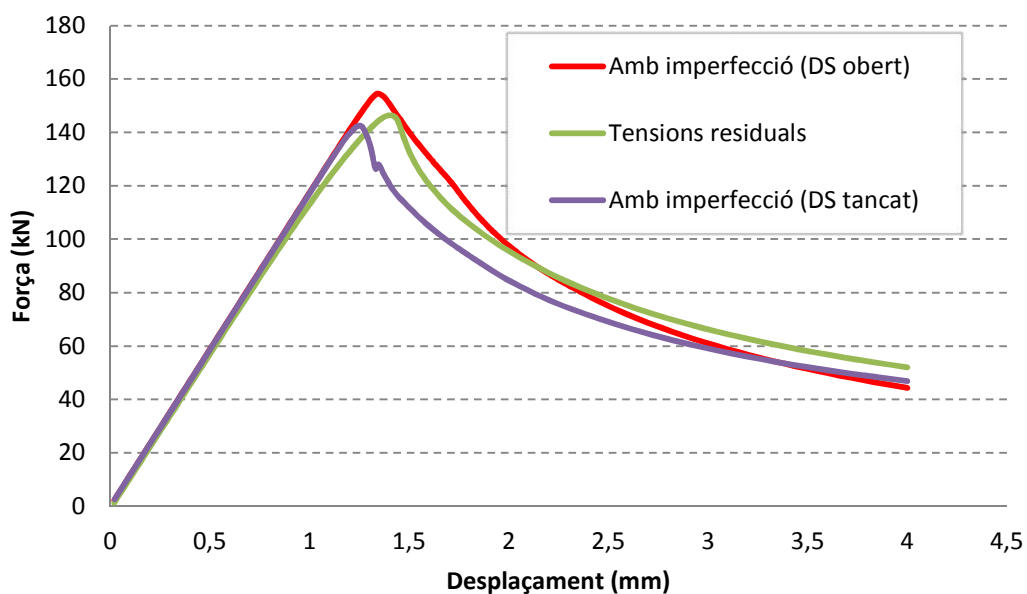


Fig. 4.24 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil sense perforacions amb 0mm d'excentricitat aplicada

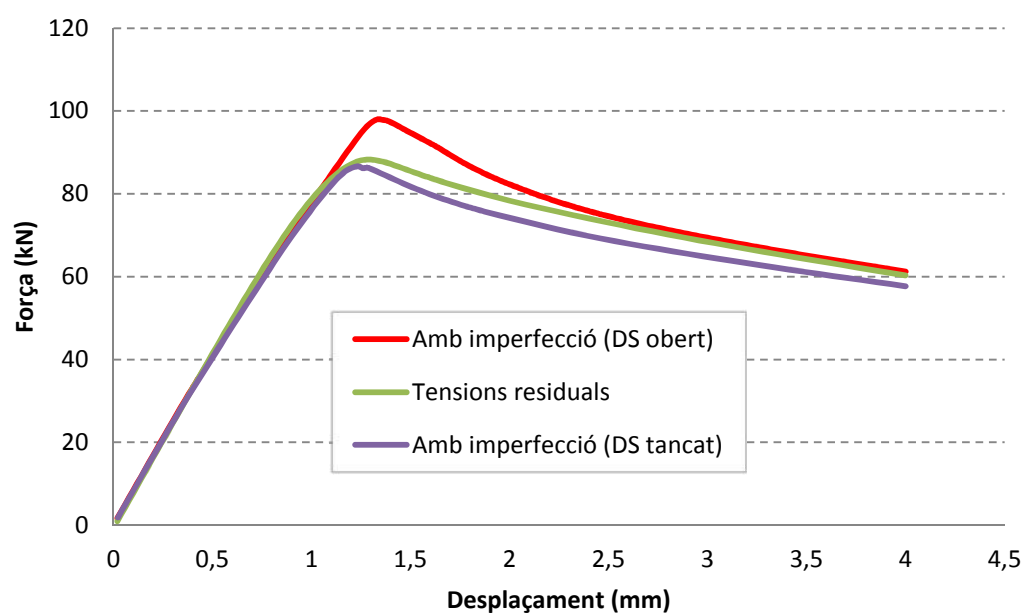


Fig. 4.25 Corbes força-desplaçament obtingudes per al perfil sense perforacions amb 0mm d'excentricitat aplicada

5. Càlcul normatiu mitjançant la normativa Europea (EN15512)

S'ha calculat la càrrega de fallida dels puntals amb i sense perforacions mitjançant la normativa Europea EN15512 i EC3 [5], que permet predir el comportament dels perfils afectats pel vinclament distorsional. Per al càlcul de les propietats geomètriques de la secció, s'ha utilitzat les següents seccions (Fig. 5.1):

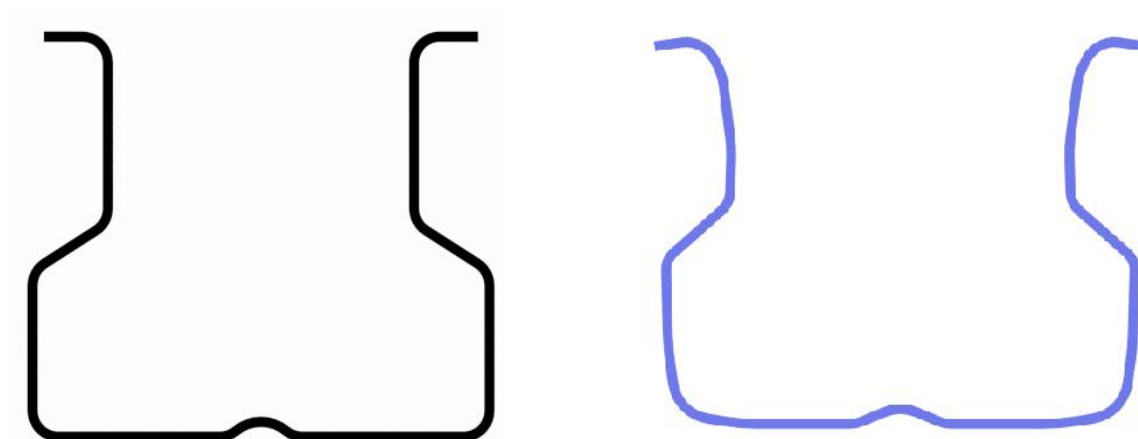


Fig. 5.1 Seccions utilitzades per al càlcul de les propietats geomètriques de la secció, amb i sense forats respectivament.

L'apartat 9.7 de la normativa EN15512 explica el procediment necessari per a obtenir la càrrega última flexo-compensió necessària per aquest apartat. Principalment, el càlcul es basa en la resolució de la següent equació (Eq. 5.1.) :

$$\frac{N_{sd}}{\frac{\chi_{min} A_{eff,D} f_y}{\gamma_M}} + \frac{k_y M_{y,sd}}{\frac{W_{eff,y} f_y}{\gamma_M}} \leq 1 \quad (Eq. 5.1)$$

on les Eq. 5.2-5.8 permeten calcular la majoria dels paràmetres presents a l'equació anterior.

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{sd}}{\chi_y A_{eff} f_y} \leq 1,5 \quad (Eq. 5.2)$$

$$\mu_y = \lambda_y (2\beta_{My} - 4) \quad (Eq. 5.3)$$

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,y}}} \quad (Eq. 5.4)$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^2}} \quad \text{amb } \chi_y \leq 1 \quad (Eq. 5.5)$$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2] \quad (Eq. 5.6)$$

$$i_0^2 = i_x^2 + i_y^2 + y_0^2 \quad (Eq. 5.7)$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \quad (Eq. 5.8)$$

En aquest cas, com que es vol conèixer el valor de la càrrega última, el valor del coeficient de seguretat, γ_M , val la unitat i es resol l'equació amb igualtat.

Pel que fa a χ_{min} , aquest correspon al calculat amb $N_{cr,FT}$ (Eq. 5.9), ja que el valor d'aquesta càrrega és menor que $N_{cr,T}$ i $N_{cr,y}$ (Eq. 5.10 i Eq. 5.11, respectivament). Aquests tipus de perfil suporten menys càrrega si el col·lapse es produeix per flexo-torsió. Per tant, l'àrea efectiva amb la que es calcula χ_{min} correspon a $A_{eff,D}$, ja que és la que correspon a una fallida a distorsional. S'utilitzen les mateixes equacions que es fan servir per al càlcul de χ_y , però utilitzant $A_{eff,D}$ i $N_{cr,FT}$ en comptes de A_{eff} i $N_{cr,y}$.

En la tesi doctoral de Bonada [6], s'exposen dues maneres alternatives de calcular la càrrega a flexo-torsió.

$$N_{cr,FT} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (Eq. 5.9)$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G I_T + \frac{\pi^2 E I_w}{L_{eT}^2} \right) \quad (Eq. 5.10)$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{eF}} \quad (Eq. 5.11)$$

Pel que fa a les diferents àrees, se'n poden diferenciar-ne tres. La primera, $A_{eff,D}$, es calcula mitjançant les indicacions del apartat 5.5.3.1(7), considerant la distorsió de la secció (Eq. 5.12):

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\chi_d = 1 \rightarrow \bar{\lambda}_d \leq 0,65$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \rightarrow 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad (Eq. 5.12)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \rightarrow \bar{\lambda}_d \geq 1,38$$

$$A_{eff,D} = \chi_d A_{bru}$$

El paràmetre $\sigma_{cr,s}$ és pot calcular mitjançant una anàlisi lineal de vinclament amb un programa especialitzat, segons l'apartat 5.5.3.1(8). A [6], s'esmenten el CUFSM i el GBTUL, a més a més del programa desenvolupat en la tesi, anomenat RLBA v1.3. No obstant, aquesta tensió es pot calcular amb una sèrie d'expressions analítiques exposades a l'apartat 5.5 de l'Eurocodi . Per a més detalls consultar la tesi doctoral.

La següent correspon a A_{eff} , que és la que es fa servir en el cas de la flexió, com ja s'ha comentat anteriorment (Eq. 5.4). Per a obtenir aquesta àrea és necessari realitzar un assaig experimental, explicat al ANNEX A.2.1 de la normativa EN15512 [5]. Aquest assaig es realitza de tal manera que no existeix una distorsió significativa de la secció. D'aquesta manera, l' A_{eff} es pot obtenir de l'equació següent (Eq.5.13):

$$A_{eff} = \frac{P_{ult,curta}}{f_y} \quad (Eq.5.13)$$

on $P_{ult,curta}$ és calcula mitjançant un assaig a columna curta, de 250mm de longitud del puntal, marcat per la normativa EC3.

Per tant, en el perfil sense perforacions aquesta àrea surt aproximadament igual que A_{bruta} . Addicionalment, es pot obtenir el valor d'aquesta àrea analíticament. En la tesi doctoral [6], s'exposen dues modelitzacions diferents per a tenir en compte el efecte de les perforacions. Aquí s'utilitzaran els resultats obtinguts experimentalment.

Per últim hi ha la A_{bruta} , que és l'àrea calculada mitjançant la metodologia del gruix equivalent. A grans trets, aquest càlcul es basa en reduir el gruix en les zones de la secció on hi ha forats. La Fig. 5.2 mostra una idea d'aquest procediment, per al perfil amb perforacions. La zona de les perforacions circulars no es considera.

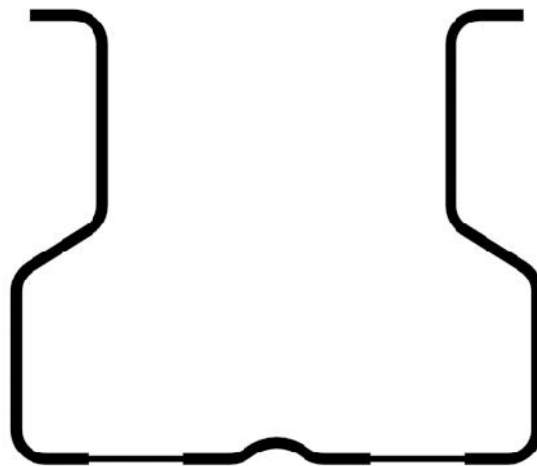


Fig. 5.2 Secció del perfil amb perforacions després d'aplicar la metodologia del gruix equivalent

Els valors de les tres àrees es poden observar a la taula 5.1 .

Àrees	SC (mm ²)	C (mm ²)
$A_{eff,D}$	335,7	279
A_{eff}	420	340
A_{bru}	422	410

Taula 5.1 Valors de les àrees dels perfils

Com l'efecte dels forats ja s'ha tingut en compte amb les àrees efectives, per a calcular $W_{eff,y}$ s'utilitza la següent equació (Eq. 5.12):

$$W_{eff,y} = \frac{I_y}{x_{max}} f_y \quad (Eq.5.12)$$

Un cop calculats tots els paràmetres de l'equació principal (Eq. 5.1), només queden les incògnites N_{sd} i $M_{y,sd}$, que corresponen a la força axial i el moment aplicats al perfil. En el cas d'aquest treball, el moment es pot expressar com una combinació lineal de la força amb pendent e_x , com es pot veure en l'equació següent (Eq. 5.13):

$$M_{y,sd} = e_x N_{sd} \quad (Eq.5.13)$$

D'aquesta manera l'equació passa a tenir només una incògnita, de fàcil solució. Els resultats obtinguts es poden veure a les taules 5.2 i 5.3. Comparant els resultats obtinguts amb els resultats experimentals, s'obtenen els gràfics Fig. 5.3 i Fig. 5.4.

Excentricitat (mm)	EC3 (kN)	Mitjana EXP (kN)	EC3/EXP
0	109,86	117,59	0,93
5	92,96	102,26	0,91
10	81,28	89,43	0,91
15	72,56	76,74	0,95
20	65,73	71,67	0,92
Mitjana			0,92
Desviació			0,02

Taula 5.2 Resultats del càlcul normatiu i comparativa amb els resultats experimentals del perfil amb perforacions

Excentricitat (mm)	EC3 (kN)	Mitjana EXP (kN)	EC3/EXP
0	129,41	142,80	0,91
5	107,51	131,98	0,81
10	92,90	119,85	0,78
15	82,23	105,89	0,78
20	74,00	93,34	0,79
Mitjana			0,81
Desviació			0,06

Taula 5.3 Resultats del càlcul normatiu i comparativa amb els resultats experimentals del perfil sense perforacions

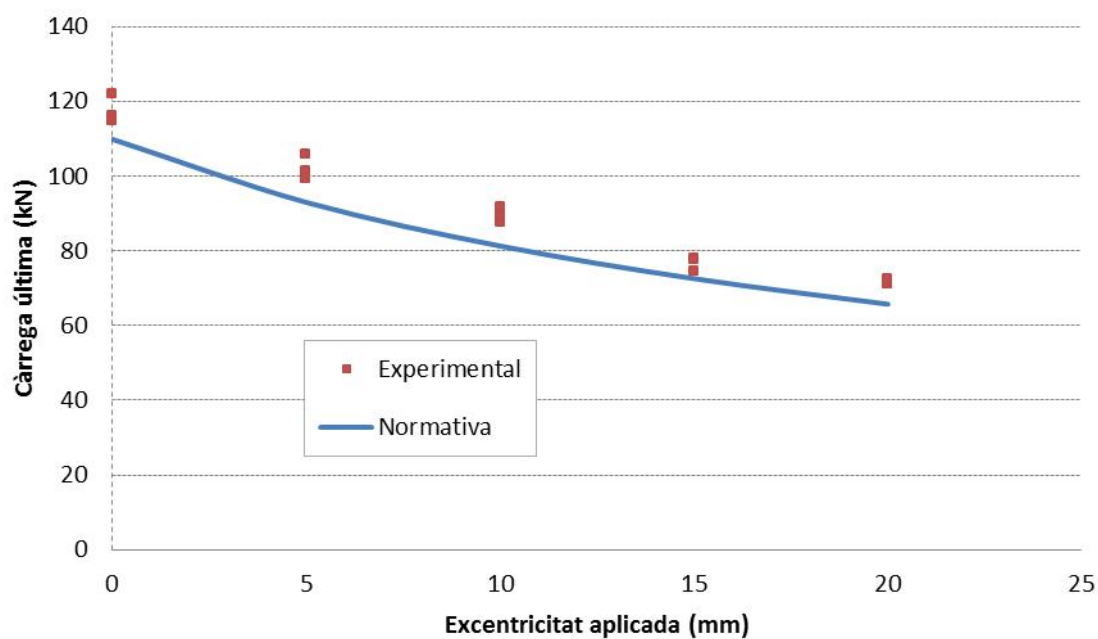


Fig. 5.3 Comparativa entre els resultats experimentals i amb normativa europea pel puntal amb perforacions

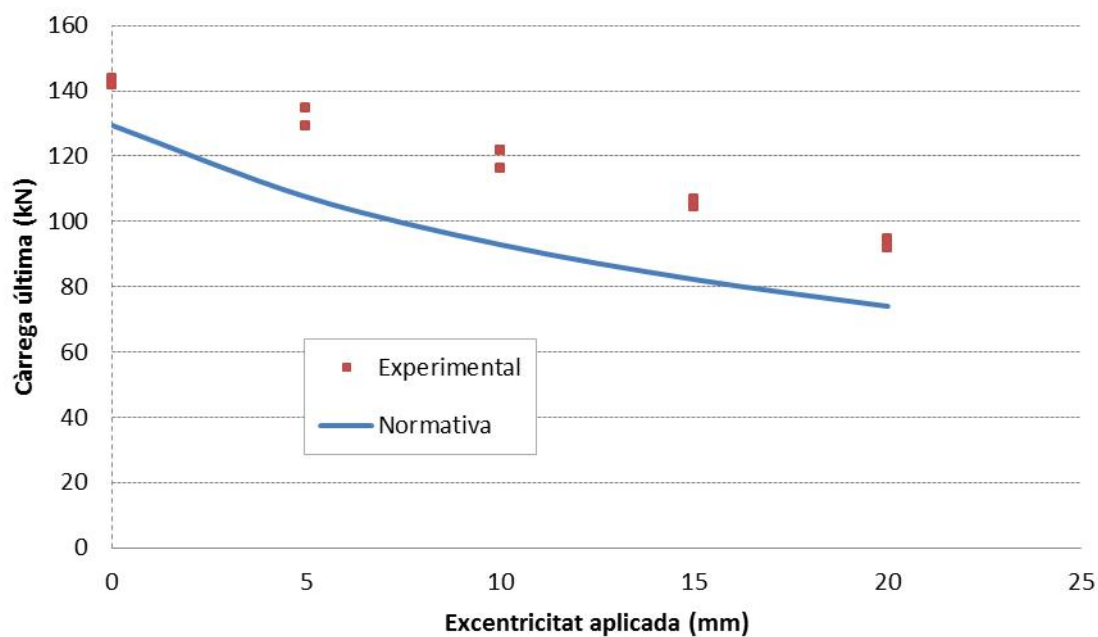


Fig. 5.4 Comparativa entre els resultats experimentals i amb normativa europea pel puntal sense perforacions

6. Comparació de resultats

En els apartats anteriors, s'ha calculat la càrrega última que suporten els puntals sotmesos a flexo-compensió per a diferents excentricitats mitjançant quatre mètodes basats en: imperfecció geomètrica, tensions residuals i enduriment per deformació, assajos experimentals i càlcul normatiu. L'objectiu d'aquest apartat és agrupar els resultats obtinguts amb les quatre metodologies esmentades i comparar-los.

És important diferenciar entre el perfil amb i sense perforacions. En el primer cas, totes les fallides crítiques observades corresponen a un mode DS tancat, per tant, únicament és necessari comparar els resultats obtinguts amb cada metodologia per aquest mode de vinclament. En canvi, en el perfil sense perforacions, existeix una divergència entre els resultats obtinguts experimentalment i els resultats numèrics i analítics. A més a més, el mode de fallida crític no és el mateix. En el cas experimental, el perfil col·lapsa mitjançant un DS obert, mentre que les càrregues últimes obtingudes amb imperfecció geomètrica i amb tensions residuals, corresponen a un DS tancat. Per tant, en aquest cas, s'ha optat per comparar ambdós modes de vinclament.

És habitual comparar els resultats numèrics i analítics obtinguts amb el resultats experimentals (Fig. 6.1 i 6.2). A les taules 6.1 i 6.2 es pot observar el quocient entre les diferents metodologies i les càrregues experimentals, agrupant totes les taules obtingudes en els apartats anteriors. Pel perfil sense perforacions, en el cas d'imperfecció geomètrica, s'escull els resultats obtinguts mitjançant la secció real (DS tancat i obert).

Excentricitat (mm)	EC3/EXP	TR/EXP	IMP/EXP	EXP (kN)
0	0,94	1,00	0,98	117,59
5	0,90	0,99	1,02	102,26
10	0,91	0,98	1,00	89,49
15	0,94	1,02	1,03	76,74
20	0,91	0,98	0,98	71,67
Mitjana	0,92	0,99	1,00	-

Taula 6.1 Comparació de les diferents metodologies amb els resultats experimentals per al perfil amb perforacions

Excentricitat (mm)	EC3/EXP	TR/EXP	DS tancat/EXP	DS obert/EXP	EXP (kN)
0	0,91	1,03	1,00	1,08	142,80
5	0,82	0,98	0,97	1,05	131,98
10	0,78	0,93	0,92	1,02	119,85
15	0,78	0,93	0,91	1,03	105,89
20	0,79	0,95	0,93	1,05	93,34
Mitjana	0,82	0,96	0,95	1,05	-

Taula 6.2 Comparació de les diferents metodologies amb els resultats experimentals per al perfil sense perforacions

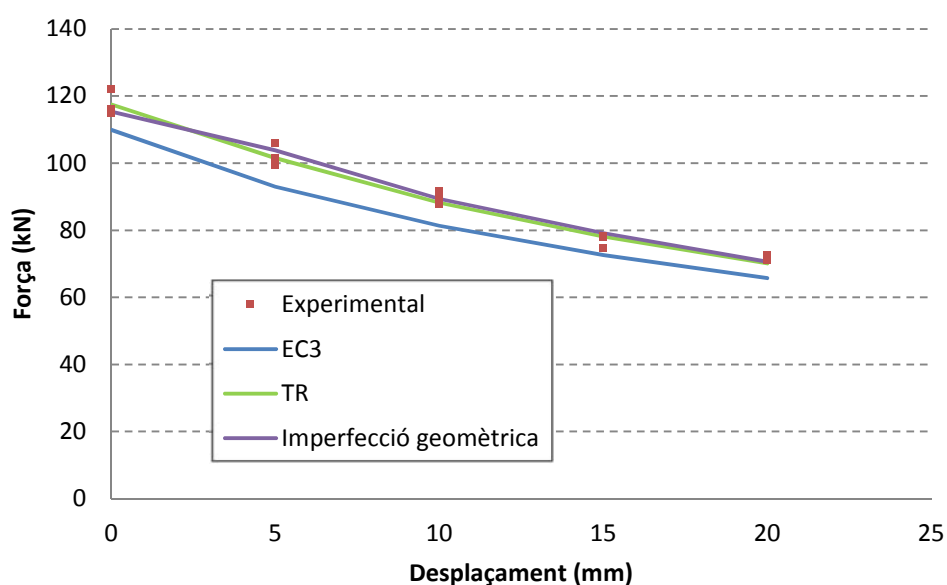


Fig. 6.1 Comparació entre les càrregues últimes obtingudes mitjançant els diversos mètodes utilitzats per al perfil amb perforacions

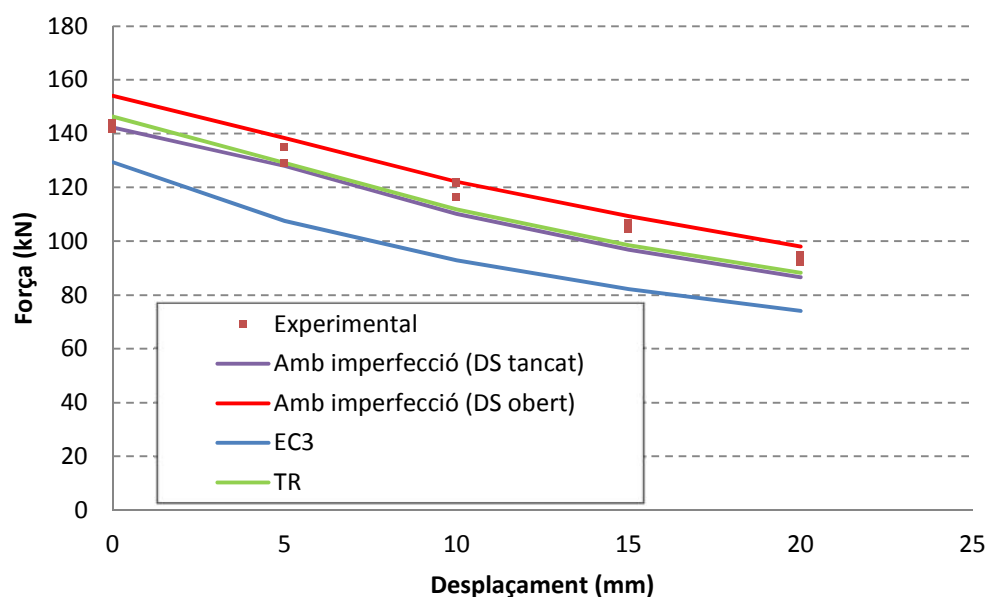


Fig. 6.2 Comparació entre les càrregues últimes obtingudes mitjançant els diversos mètodes utilitzats per al perfil sense perforacions.

A més a més, és important representar conjuntament les gràfiques força-desplaçament, degudament filtrades, de tots els mètodes utilitzats durant el treball, tant dels numèrics com dels assajos experimentals. En aquest cas, es mostren aquestes corbes per ambdós perfils per a 10 i 20mm d'excentricitat (Fig. 6.3-6.6). Per a consultar la resta de gràfiques, consultar l'ANNEX D.

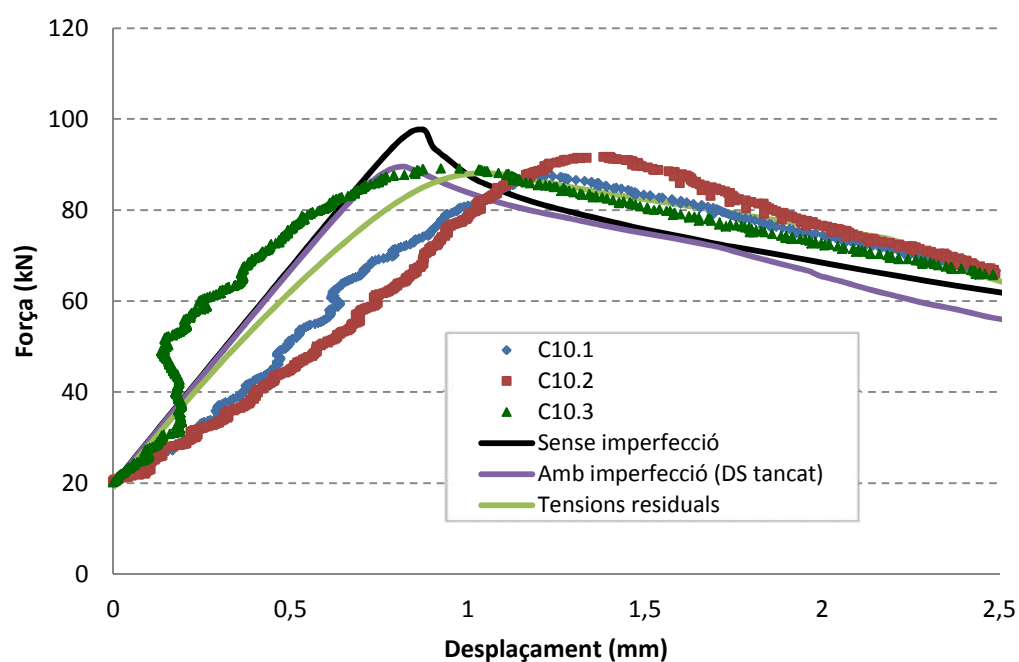


Fig. 6.3 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil amb perforacions i 10mm d'excentricitat aplicada

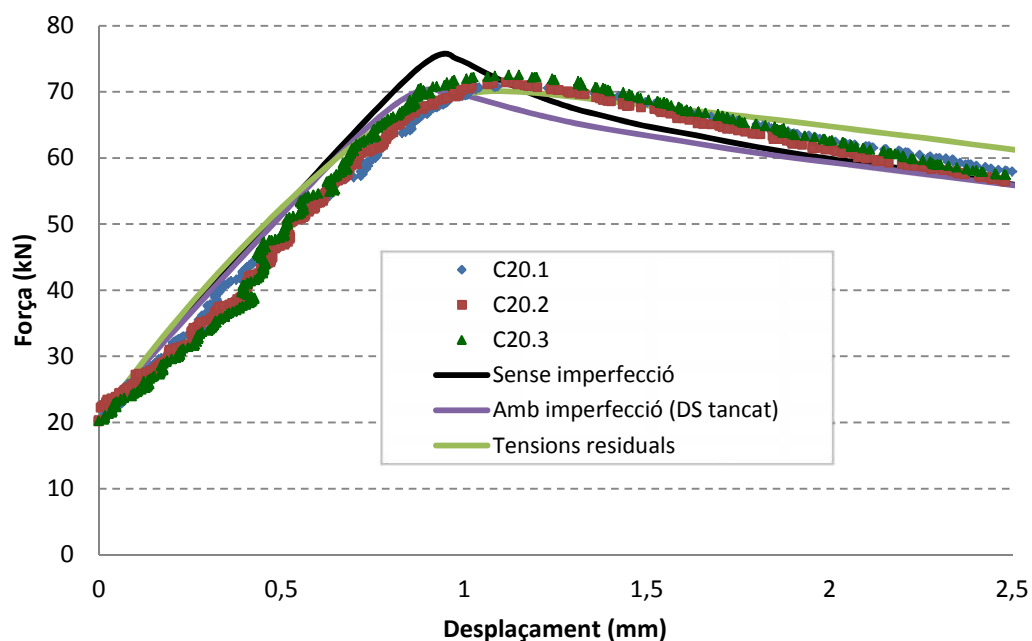


Fig. 6.4 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil amb perforacions i 20mm d'excentricitat aplicada

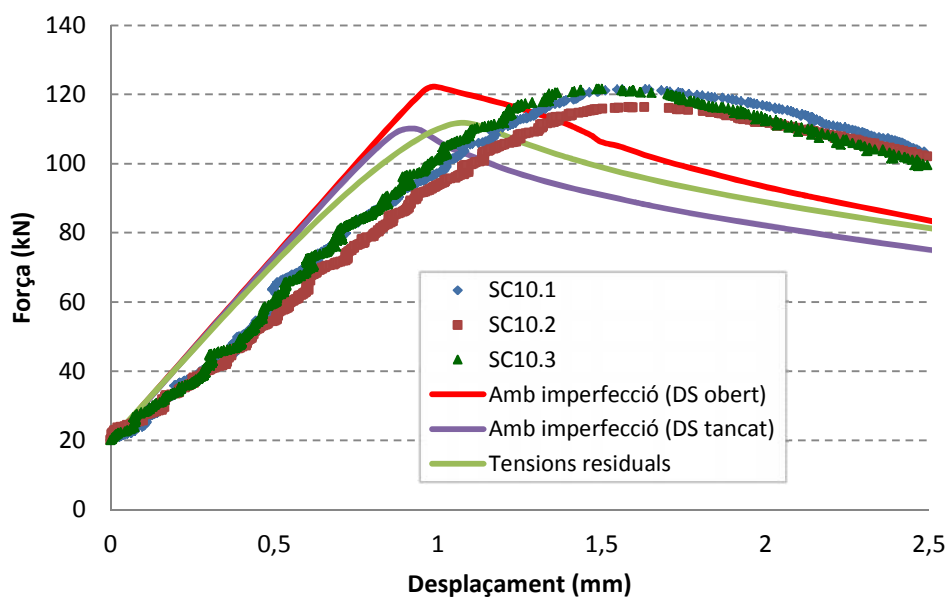


Fig. 6.5 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil sense perforacions i 10mm d'excentricitat aplicada

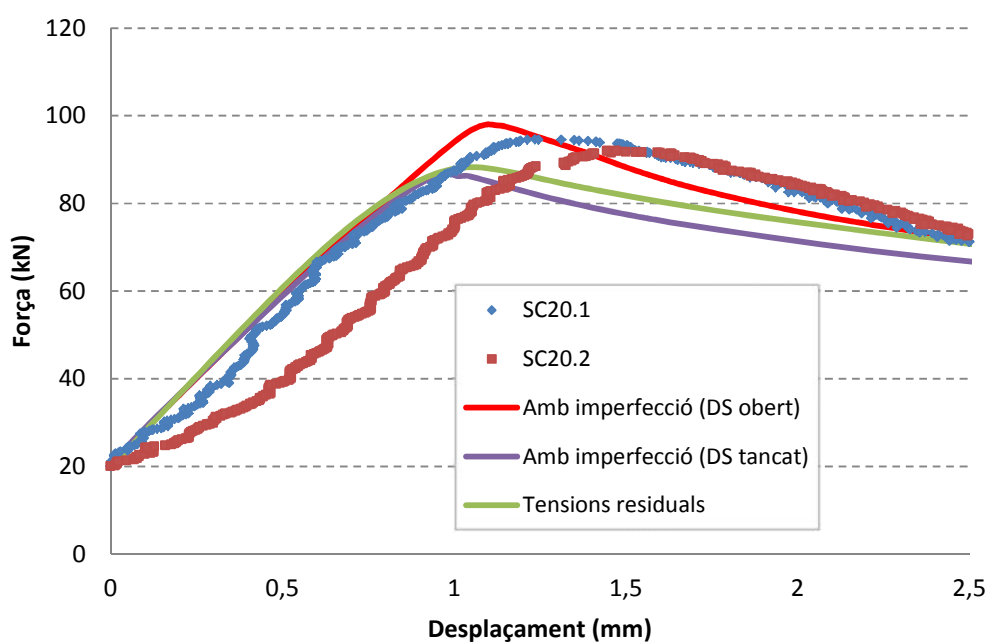


Fig. 6.6 Corbes força-desplaçament dels mètodes numèrics i els assajos experimentals per al perfil sense perforacions i 20mm d'excentricitat aplicada

7. Estudi econòmic

En primer lloc, es poden diferenciar dos persones físiques a les quals associar un cost: el projectista i el tutor o director del treball. El cost s'estudiarà com a €/h en brut. És a dir, no és el preu que la persona rep com a producte del seu treball, sinó el preu que suposa per la empresa. Els preus per hora i totals es mostren a la Taula 7.1:

Descripció	Dedicació (h)	Preu unitari (€/h)	Preu (€)
Projectista	400	30,00	12.000,00
Director	150	40,00	6.000,00
Total			18.000,00 €

Taula 7.1 Cost intel·lectual del treball

En segon lloc, està el cost material. Aquest inclou els assajos a tracció realitzats, els assajos a flexo-compresió i la construcció de la placa que permet aplicar una excentricitat a la càrrega. En aquest últim cas, és important diferenciar entre el cost de material i el temps necessari per conformar la placa. En el primer cas, s'ha inclòs el cost del material i d'eines utilitzat durant els assajos a compressió més el cost dels tècnics de laboratori, indicant el preu per a cada un dels assajos. És important considerar el temps de preparació d'aquests. A més a més, s'inclou el cost de les plaques que subjecten el puntal. Els costos s'indiquen a la taula següent (Taula 7.2):

Descripció	Hores requerides (h)	Preu unitari (€/h)	Preu material (€)	Preu (€)
Cost utilitatge (placa excentricitat)	10,00	24,00	21,83	261,83
Descripció	Nº d'assajos	Preu unitari (€/assaig)	Preu suport del puntal	Preu (€)
Cost dels assajos a flexo-compresió	30,00	83,30	1.000,00	3.500,00
Cost dels assajos a tracció	6,00	58,00	-	348,00
Total				4.109,00

Taula 7.2 Cost dels assajos experimentals i tècnics de laboratori

Per al desenvolupament del treball ha estat necessari la utilització de diferents programes de càlcul i de disseny 3D com: ANSYS 13.0, SolidWorks 13 i Blender 2.72b.

La llicència campus és un acord de lloguer de programari que permet a la Universitat utilitzar els productes informàtics (en tots els ordinadors disponibles) durant un any. La Universitat signa aquest acord amb diferents companyies de programari i paga una quota anual que depèn del nombre d'estudiants i els productes que vulgui llicenciar. La Universitat Politècnica de Catalunya obté cada aquesta llicència per a l'obtenció dels programes SolidWorks o Matlab, entre d'altres. En canvi, la llicència del programa ANSYS 13.0 és obtinguda pel DRMEE. En el cas d'aquest treball, s'ha utilitzat la llicència Mechanical, d'ANSYS, per al càlcul estructural. El departament disposa de 5 tasques d'aquesta llicència. Per últim, el software Blender 2.72b és un programa gratuït que es pot obtenir de manera senzilla per el navegador.

El cost de programari es mostra a la Taula 7.3:

Descripció	Llicència	Preu llicència (€/any*tasca)	Mesos d'utilització	Preu (€)
SolidWorks 13.0	Llicència Campus	100,00	9 mesos	75,00
ANSYS 13.0	-	500,00	9 mesos	375,00
Blender 2.72b	-	-	9 mesos	gratuït
Total				450,00

Taula 7.3 Cost de programari (software)

Finalment, s'agrupen tots els costos anteriors i el cost total resultant és de **22.484,00€** (Taula 7.4):

Descripció	Preu (€)
Cost intel·lectual	18.000,00
Cost material	4.109,00
Cost software	375,00
Total	22.484,00

Taula 7.4 Cost del treball fi de grau

8. Estudi d'impacte ambiental

Per a la realització dels assajos experimentals ha estat necessari utilitzar una sèrie de perfils primers d'acer. Aquests queden inutilitzables després del col·lapse, el que fa que sigui necessari gestionar aquests residus obtinguts. Aquests perfils, col·locats adientment en palets, són entregats a una empresa especialitzada en tractar i recuperar ferralles metàl·liques, entre d'altres. L'empresa corresponent, anomenada Viuda de Lauro Clariana S.L., recicla el material recollit per tal de donar-li un nou ús. Aquesta empresa té el suport del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya. D'aquesta manera, els residus generats durant els assajos experimentals, no tenen un impacte directe sobre el medi ambient, ja que són reutilitzats per un altre fi. Això no vol dir que els processos d'obtenció o de reciclatge d'aquests punts, no suposin un impacte pels possibles gasos emesos o qualsevol altre causa.

En els assajos experimentals, també ha estat necessari la utilització de cert utillatge per poder sotmetre els punts als esforços desitjats. Aquest utillatge es guarda al LERMA, amb la intenció que pugui ser utilitzat en un futur per a més assajos. A més a més, les plaques dissenyades en aquest treball van ser construïdes mitjançant la reutilització d'unes plaques d'acer.

Durant el treball, també ha estat necessari la utilització de diversos ordinadors per tal de poder dur a terme les simulacions numèriques requerides. El consum d'energia elèctrica per part d'aquests equips és el impacte mediambiental que pot suposar el seu ús, ja que en algunes simulacions el temps de càlcul ha estat considerable. Malgrat això, el mètode dels elements finits permet predir amb precisió els valors de càrrega última que pot suportar el punt. Per tant, el fet de realitzar simulacions numèriques ajuda a tenir una idea de quina pot ser aquesta càrrega i, així, poder reduir el nombre d'assajos experimentals, reduint el material requerit per els assajos i els posteriors residus generats.

9. Conclusions

L'estudi de perfils primers d'acer tipus *rack* assajats a compressió o flexo-compresió és complex. La deformació seccional produïda en el vinclament distorsional, que és el tipus de col·lapse que apareix en aquest treball, dificulta tant l'estudi analític com les possibles simulacions numèriques per a calcular la càrrega última que suporten aquests puntals.

En primer lloc, el mètode analític utilitzat (Normativa EN15512) facilita el càlcul resistent, ja que aporta una sèrie d'equacions que proporcionen un valor de càrrega última del puntal en estudi. És molt important utilitzar en cada una d'aquestes els paràmetres geomètrics del perfil adjacents, com poden ser les diferents àrees mencionades en el càlcul normatiu. Aquestes equacions proporcionen resultats conservadors respecte als assajos experimentals i les simulacions numèriques. La normativa presenta certa dificultat en l'estudi del perfil amb perforacions, ja que no indica una metodologia concreta per a considerar l'efecte dels forats (A_{bru}).

En segon lloc, és necessari la introducció d'una imperfecció geomètrica "fictícia" en les simulacions numèriques, ja que aquesta proporciona una càrrega última semblant a les obtingudes amb experimentació, en contraposició a no introduir-ne. Per a les excentricitats estudiades en aquest treball, no es pot concloure que al augmentar l'excentricitat de la càrrega, els resultats obtinguts mitjançant imperfecció geomètrica i sense siguin més propers. El fet de tenir la distorsió d'una ala al augmentar la excentricitat, fa pensar en que és necessària la introducció d'una imperfecció geomètrica per a les simulacions numèriques.

A més a més, en les simulacions numèriques és molt important escollir adequadament el mode de vinclament a utilitzar per el càlcul de la càrrega. La utilització de diferents modes pot donar lloc a resultats completament diferents (DS tancat o obert). Per tant, és imprescindible comparar diversos, per a poder extrapolar quin és el més crític. A més a més, és essencial centrar-se en el col·lapse dels puntals assajats experimentalment per a escollir aquest mode crític.

Les diferències entre el mode DS i el DA es redueixen a mesura que l'excentricitat augmenta, fins a un punt, que els resultats són pràcticament iguals. Com s'ha comentat al apartat 1, la introducció d'excentricitat produeix un tipus de vinclament distorsional que no pot ser catalogat ni com DS ni DA. Per tant, els càlculs realitzats mitjançant la introducció d'aquestes dues formes de vinclament, produeixen una fallida en la que una ala doblega més que l'altra i, per tant, les càrregues obtingudes són pràcticament iguals, si l'excentricitat s'aplica cap al costat a on el DA és més crític. És a dir, el mecanisme de col·lapse és el

mateix per ambdós modes de vinclament, a mesura que augmenta l'excentricitat.

D'altra banda, els resultats obtinguts amb la introducció de les tensions residuals i l'enduriment per deformació són molt semblants als resultats obtinguts mitjançant imperfecció geomètrica, en els dos perfils estudiats. Encara que el temps de càlcul del primer sigui bastant més elevat que en el segon cas, el càlcul amb tensions residuals no fa necessari definir una forma d'imperfecció geomètrica, ni tampoc plantejar-ne un valor. Aquest presenta una gran avantatge, ja que no és necessari conèixer el tipus de col·lapse dels assajos experimentals per a poder obtenir un valor de càrrega última.

A més a més, si es comparen les corbes força-desplaçament d'ambdós mètodes, es poden observar diverses avantatges. Les corbes del mètode de les tensions residuals presenten una rigidesa menor i, per tant, s'adapten millor a les corbes dels assajos experimentals. A més a més, la transició des del màxim fins la zona de post-col·lapse es duu a terme de forma suau. A més, les corbes experimentals presenten també una transició suau. Per tant, és recomanable la seva introducció en el càlcul resistent. En canvi, per als altres mètodes numèrics, amb la introducció o no d'imperfecció geomètrica, aquesta transició sol ser més brusca, dificultant en alguns casos el càlcul de la corba.

Per al perfil sense perforacions, els resultats obtinguts difereixen, entre les diferents metodologies emprades, en un major grau que en el perfil amb perforacions. Aquest fet, pot estar lligat a la no simetria del puntal o també, que aquest no acaba de presentar una homogeneïtat al llarg de la seva longitud, tant del gruix com de la mateixa secció. Per tant, aquestes variacions poden provocar les divergències entre els mètodes analítics i numèrics i els assajos experimentals. Aquestes no són exageradament grans, si més no, contrasten amb l'altre tipus de perfil.

Agraïments

Primerament, m'agradaria agrair la col·laboració i suport del professor J.Bonada, ja que sense ell no hagués estat capaç de dur a terme aquest treball. Els seus amplis coneixements i l'interès mostrat durant tota la meva estància al departament, m'han ajudat a fer-me més fàcil el treball i a enfrontar amb més ganes els problemes sorgits durant aquest.

En segon lloc, m'agradaria agrair a tots els professors i tècnics de laboratori la seva amabilitat i coneixements rebuts, en concret al tècnic Francesc Joaquim i la professora Magdalena Pastor, que m'han ajudat en tot moment i m'han fet passar una estància molt agradable al departament.

També agrair a Bruno Bernardo, company del centre de càlcul del departament, la companyia d'amistat rebuda durant l'estància.

Per últim, i com a imprescindible, agrair als meus pares l'esforç que han fet des de la meva infància per donar-me la possibilitat de rebre una bona educació, així com una molt bona capacitat de esforçar-me en moments difícils i no tan difícils, i per donar-me la oportunitat de poder fer aquest grau, així com el posterior post-grau l'any vinent. També agrair, als meus amics de tota la vida i els coneguts en aquesta escola, el recolzament durant tot el grau.

Bibliografia

- [1] Roure F, Pastor MM, Casafont M, Somalo MR. Stub column test for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. *Thin-Walled Structures* 2011; 49:167-184
- [2] Conventional Pallet racking. Mecalux SA.
- [3] Casafont M, Pastor MM, Roure F, Peköz T. An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns. *Thin-Walled Structures* 2011; 49:933-946.
- [4] UNE-EN-10002-1. Versió oficial, en espanyol, de la Norma Europea EN 10002-1. Juliol de 2001.
- [5] EN 15512. Steel static storage systems – Adjustable pallet racking system – Principles for structural design. European Standard. European Committee for Standardization. March 2009.
- [6] Bonada, J. Anàlisi a compressió de perfils prims oberts d'acer conformats en fred. Tesi doctoral, UPC, Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, 2013 [Biblioteca Rector Gabriel Ferraté de la Universitat].
- [7] ANSYS Release 13.0 Documentation, Ansys Inc.
- [8] MATLAB Release R2007b Documentation, Mathwork.
- [9] BLENDER Release 2.72b Documentation, NaN.
- [10] SolidWorks Release 2014 SP3, Dassaul Systèmes SolidWorks Corp.
- [11] Halmos G.T. Roll forming Handbook. CRC Press, 2006.
- [12] Hancock GJ, Kwon YB, Bernard ES. Strength design curves for thin-walled sections undergoing.
- [13] Kwon YB, Hancock GJ. Tests of cold-formed channels with local distortional buckling. *Journal of Structural Engineering* 1992; 118:1786-803.
- [14] Polyzois D, Charnvarnichborikarn P. Web-flange interaction in cold-formed steel Z-section columns. *Journal of Structural Engineering* 1993;119:2607-28.
- [15] Serrette RL, Peköz T. Distortional buckling of thin-walled beams/panels. II: design methods. *Journal of Structural Engineering* 1995; 121:767-76.
- [16] Batista EM, Rodrigues FC. Buckling curve for cold-formed compressed members. *Journal of Constructional Steel Research* 1994;28:121-36.

- [17] Batista E, Camotim D, Prola LC, Vaz E. On the stability and strength of steel columns affected by distortional buckling. *Journal of Constructional Steel Research* 1998;46:129-31.
- [18] Silvestre N, Camotim D. On the mechanics of distortion in thin-walled open sections. *Thin-Walled Structures* 2010; 48: 469-481.
- [19] Bathe, KJ. *Finite Element Procedures*. Precinte-Hall, Inc; 1996.
- [20] Fàbrega, J. Comparació de mètodes d'anàlisi estructural d'una prestatgeria "DRIVE-THROUGH". Projecte final de carrera, UPC, Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria. 2013.
- [21] Roller Die+Forming. Custom Roll Forming Processes, Techniques and Services. [Consulta: 5 de juny 2015]. Disponible a : <http://www.rollerdie.com/roll-forming/>.